

Apuntes Tema 11:

MAQUINAS ELECTRICAS

11 MAQUINAS ELECTRICAS	2
11.1 INTRODUCCIÓN	2
11.1.1 <i>Conceptos generales de las máquinas eléctricas.</i>	2
11.1.2 <i>Conceptos generales de los generadores eléctricos</i>	4
11.1.3 <i>Dirección de la f.e.m, regla de Fleming</i>	6
11.1.4 <i>Corriente Continua</i>	11
11.1.5 <i>Componentes del generador.</i>	16
11.1.6 <i>Preguntas de autoevaluación.</i>	18
11.2 MOTORES.....	18
11.2.1 <i>Conceptos generales de los motores eléctricos.</i>	19
11.2.2 <i>Fuerza electromagnética ejercida sobre un cable conductor</i>	20
11.2.3 <i>Potencia y par de un motor eléctrico.</i>	26
11.2.4 <i>Motores eléctricos de Corriente Continua.</i>	27
11.2.4.1 Desde el punto de vista del tipo de corriente eléctrica pueden ser:	30
11.2.4.2 Desde el punto de vista electromagnético se pueden considerar constituidos por: 30	
11.2.4.3 Definiciones	31
11.2.4.4 Conexiones del motor de corriente continua	34
11.2.4.5 Excitación Serie	34
11.2.4.6 Autoexcitación Shunt o Paralelo.	36
11.2.4.7 Excitación Compound.....	38
11.2.4.8 Preguntas de autoevaluación.....	39
11.2.5 <i>Motores eléctricos de Corriente Alterna</i>	40
11.2.5.1 Máquinas de inducción: Motores Asíncronos.....	41
11.2.5.2 Motores de inducción trifásicos.....	46
11.2.5.3 Motores Universales	52
11.2.5.4 Preguntas de autoevaluación.....	53

11.2.6	Motores paso a paso.....	53
11.2.6.1	Motores de reluctancia variable	56
11.2.6.2	Motores de imán permanente	58
11.2.6.3	Preguntas de autoevaluación.....	62
11.3	BIBLIOGRAFÍA.....	63

11 MAQUINAS ELECTRICAS

11.1 Introducción

- **Definición de máquina.**

Dispositivo o conjunto de aparatos combinados, que recibe cierto tipo de energía y la transforma en otra más adecuada para producir un efecto buscado.

11.1.1 Conceptos generales de las máquinas eléctricas.

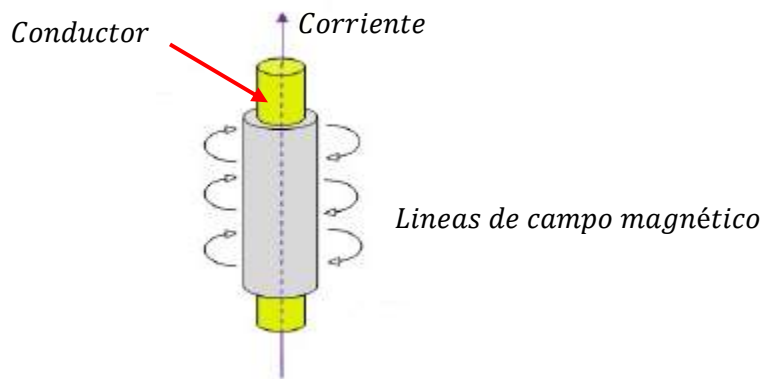
Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados. Durante todo el proceso histórico de su desarrollo desempeñaron un papel rector, que determinaba el movimiento de toda la ingeniería eléctrica, merced a su aplicación en los campos de la generación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica. Las máquinas eléctricas realizan una conversión de energía de una forma a otra, una de las cuales, al menos, es eléctrica. En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

1. **Generador:** transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m. inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento. En consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente.
2. **Motor:** transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina; aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y que por ello se denomina fuerza contra electromotriz. En consecuencia, el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.
3. **Transformador:** transforma una energía eléctrica de entrada (de CA) con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida (de CA) con magnitudes diferentes.
Los generadores y motores tienen un acceso mecánico y por ello son máquinas dotadas de movimiento, que normalmente es de rotación; por el contrario, los transformadores son máquinas eléctricas que tienen únicamente accesos eléctricos y son máquinas estáticas.

Cada máquina en particular cumple el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que son reversibles, pudiendo funcionar como generador o como motor (en la práctica, existe en realidad alguna diferencia en su construcción, que caracteriza uno u otro modo de funcionamiento).

11.1.2 Conceptos generales de los generadores eléctricos

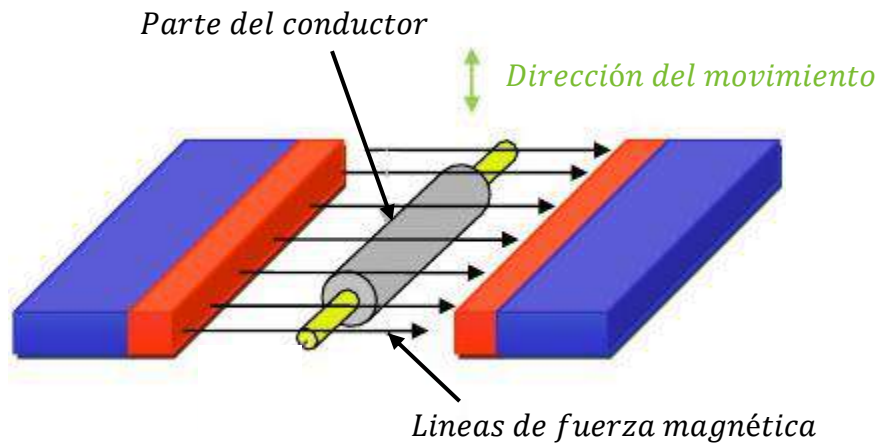
- **Fundamentos de Magnetismo:** Un imán puede ser permanente o temporal. Si una pieza de hierro o de metal se magnetiza y retiene el magnetismo se le conoce como imán permanente, este se usa en motores de pequeño tamaño. Cuando una corriente circula a través de una bobina, se crea un campo magnético con un polo norte y sur, como si se tratara de un imán permanente. Sin embargo cuando la corriente se interrumpe, desaparece el campo magnético. A este tipo de magnetismo temporal se le conoce como electromagnetismo. Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor, las líneas de fuerza magnética (flujo magnético) se crean alrededor del mismo.



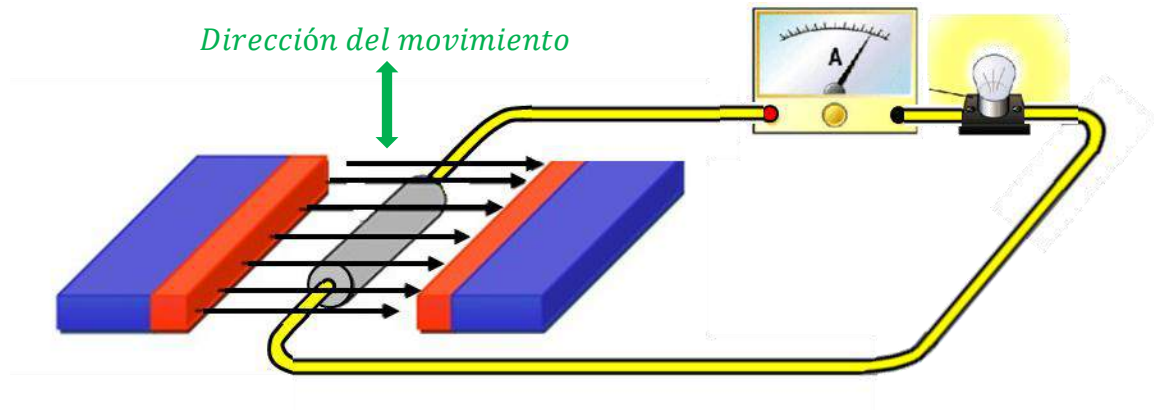
Cuando la sección de un conductor se hace pasar a través de un campo magnético, se dice que se induce un voltaje y se crea la electricidad en el conductor o alambre si el circuito está cerrado. De esta manera puede comprobarse la relación entre el magnetismo y la electricidad.

- **La inducción electromagnética:** Si el alambre conductor se mueve dentro de un campo magnético, de manera que el conductor corte las líneas de dicho campo, se origina una fuerza electromotriz producida en

dicho conductor. Induciendo la fuerza electromotriz, mediante el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético, se presenta lo que se conoce como la inducción electromagnética, se inducirá un voltaje en este conductor.



Cerrando el circuito, mediante el uso de un medidor puede comprobarse que circula corriente por el conductor, como se muestra en la figura.



En 1831 Joseph Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes del electromagnetismo que actualmente se conoce como: La ley inducción electromagnética de Faraday, que relaciona fundamentalmente el voltaje y el flujo magnético en el circuito. El enunciado de la ley es:

Si se tiene un flujo magnético que rodea a una espira y, además, varía con el tiempo, se induce un voltaje entre los terminales. El valor del voltaje inducido es proporcional al índice de cambio del flujo.

Por definición y de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades, cuando el flujo varía en 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1 volt entre sus terminales; en consecuencia si el flujo varía entre una bobina de N espiras, el voltaje inducido se da por la expresión:

$$E = N \frac{d\phi}{dt}$$

Dónde: $E =$ voltaje inducido en volts

$N =$ número de espiras

$d\phi =$ cambio de flujo de la espira

$dt =$ intervalo de tiempo en que el flujo cambia

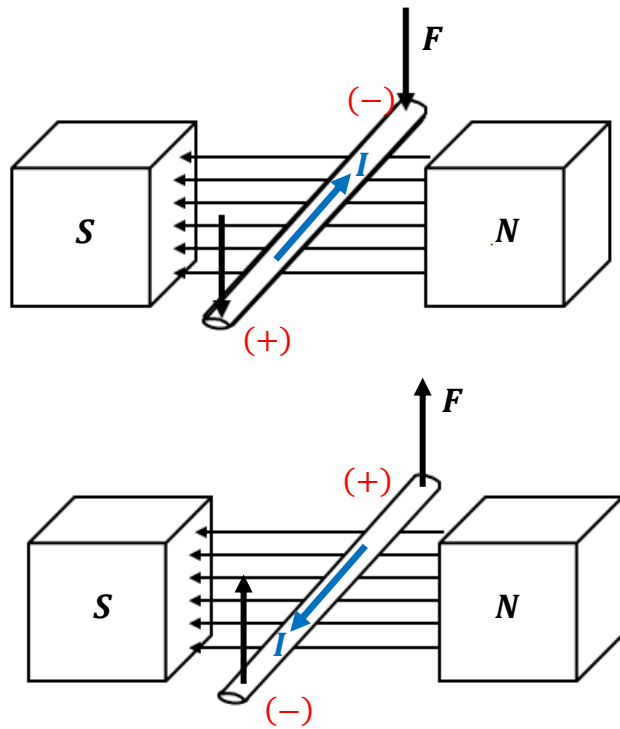
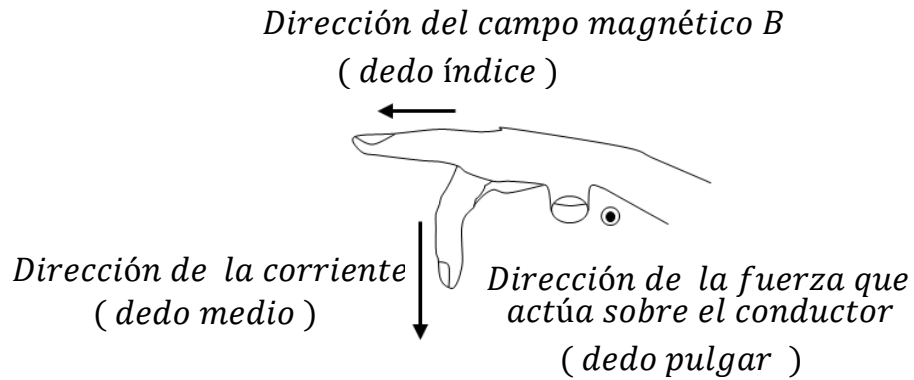
La ley de Faraday, establece las bases para las aplicaciones prácticas en el estudio de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

11.1.3 Dirección de la f.e.m. regla de Fleming

- La relación entre las direcciones de la f.e.m. inducida, campo magnético y movimiento del conductor se puede representar mediante la regla de Fleming en esta se emplea una corriente convencional para determinar la dirección de la f.e.m., esta regla también es conocida como la regla de la mano derecha.

Esta regla señala que se usa el pulgar para representar el movimiento del conductor sobre el campo, el cual es un movimiento perpendicular hacia arriba,

el índice representa la dirección del campo magnético y el dedo representa la dirección de la f.e.m.

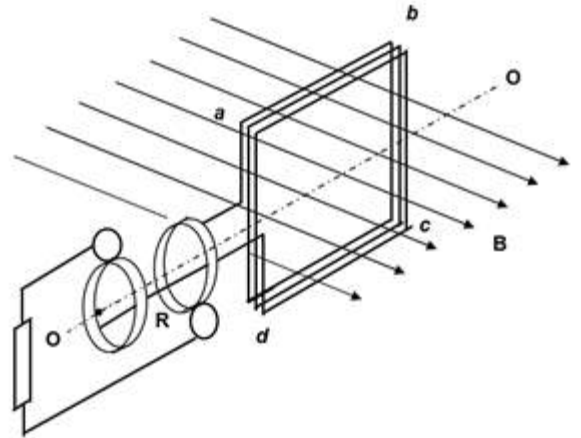


Mientras se mantenga el movimiento del conductor habrá, por consiguiente, una corriente. Por ello el conductor móvil se comporta como un generador de fuerza electromotriz.

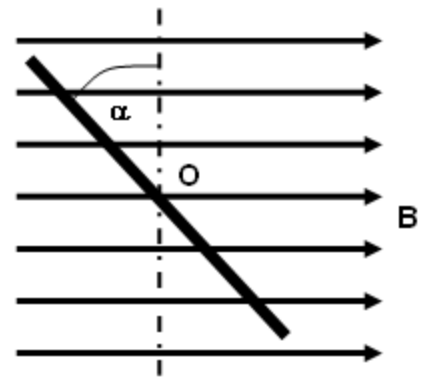
En consecuencia será necesaria una fuerza exterior suministrada por algún dispositivo que produzca trabajo para mantener el movimiento del conductor.

Tal trabajo generalmente se hace de distintas maneras como ser con un motor acoplado al eje del generador o en forma hidráulica en donde los alabes de la turbina son movidas por la fuerza del agua.

Aplicando la ley de Faraday Lentz en la siguiente figura. Se observa un cuadro rectangular abcd compuesto por un arrollamiento de N espiras que gira alrededor de un eje OO. Cada extremo del cuadro está conectado a sendos anillos rozantes R concéntricos con el eje del cuadro y que pueden girar con él, pero aislados entre sí. Mediante dos escobillas apoyadas a los anillos se conecta, a por ejemplo una resistencia.



El cuadro gira en el sentido de las agujas del reloj y en la figura se analiza el instante en que el cuadro forma un ángulo α con la normal al campo. El flujo que atraviesa la bobina estará dado por:



$$\Phi = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

Dónde: $A = \text{área abarcada por la bobina}$

$B = \text{campo magnético}$

Reemplazando en la expresión de Faraday Lentz queda:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(A \cdot B \cdot \cos \alpha)}{dt} = -N \cdot A \cdot B (-\text{sen } \alpha) \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

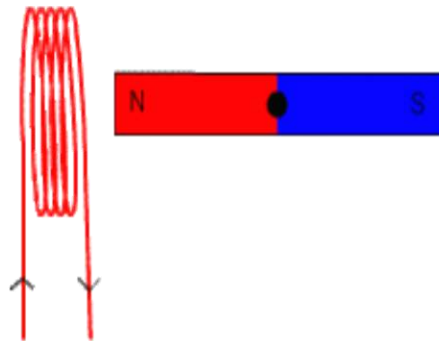
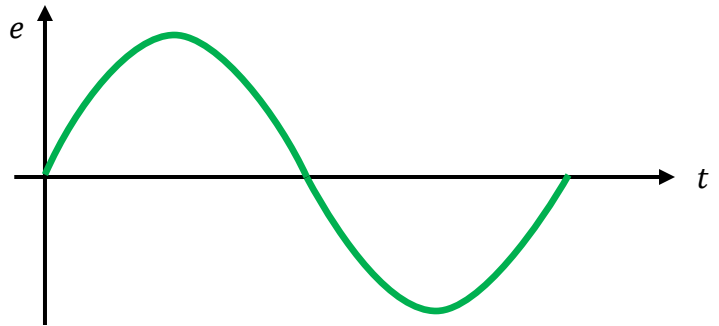
Como $\alpha = \omega \cdot t$ se llega a:

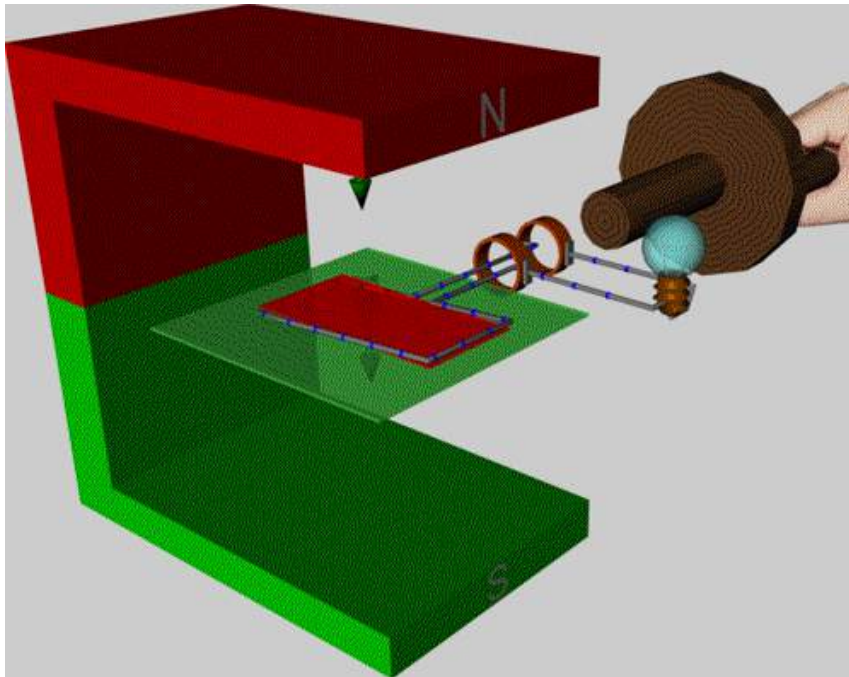
$$E = N \cdot A \cdot B \cdot \sin wt \cdot \frac{d(wt)}{dt} = N \cdot A \cdot B \cdot \sin wt \cdot w$$

Siendo $E_{max} = N \cdot A \cdot B \cdot w$, con lo cual queda:

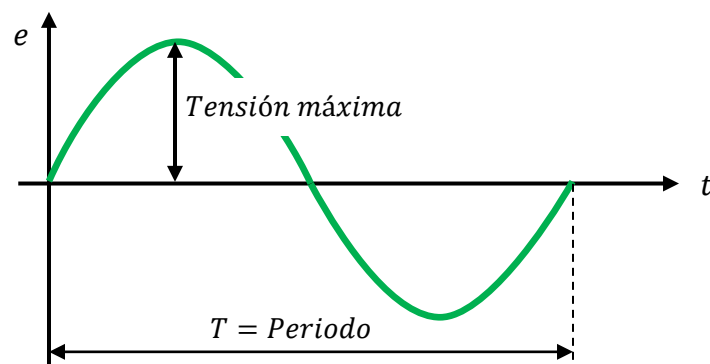
$$E = E_{max} \cdot \sin wt$$

La fem generada tiene la forma:



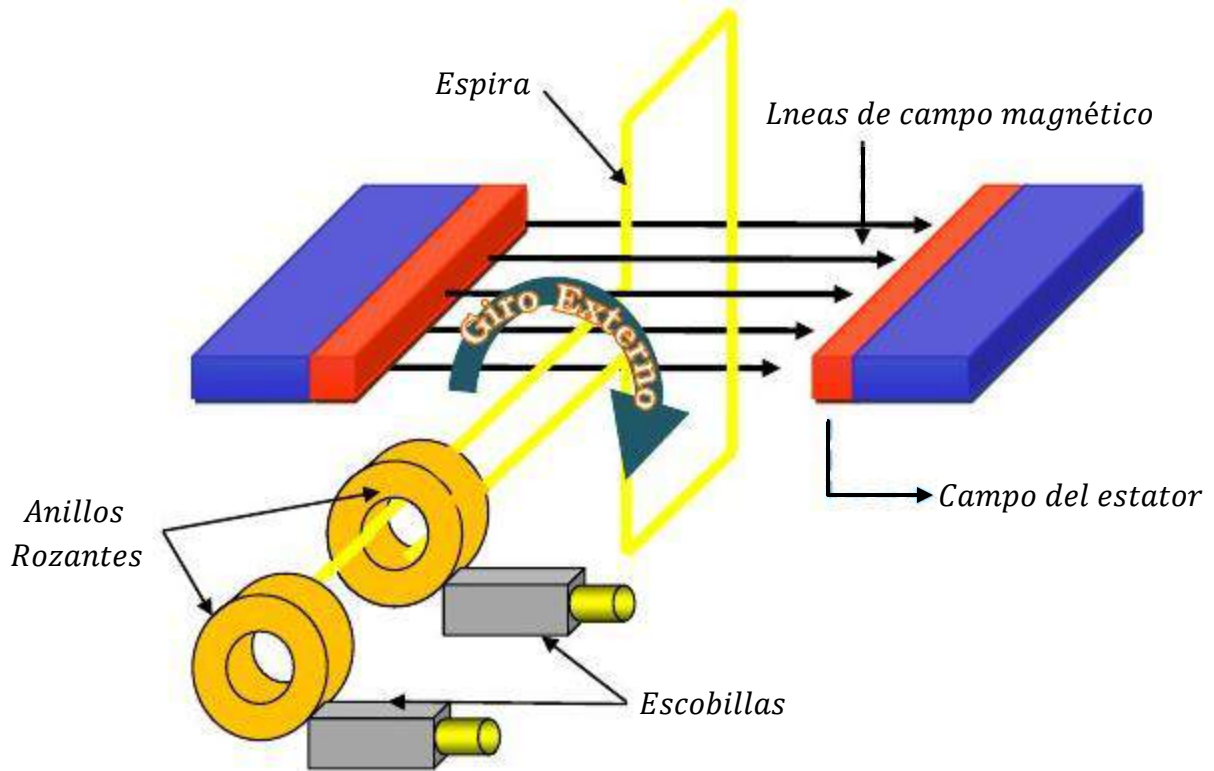


Se pueden identificar en ella los siguientes parámetros: la tensión máxima, tanto para el semiciclo positivo como para el negativo y el período T . Por otro lado, la inversa del período permite obtener la frecuencia de la corriente alterna cuya unidad es el Hz.



La forma de funcionamiento básica de un generador monofásico se muestra en la siguiente figura, la forma de la onda de voltaje o corriente que se obtiene es

de tipo senoidal, con la mitad de la onda positiva y la mitad negativa, debido a la inversión de la corriente durante la mitad del giro de la espira dentro del generador, este tipo de onda se muestra en la figura anterior.

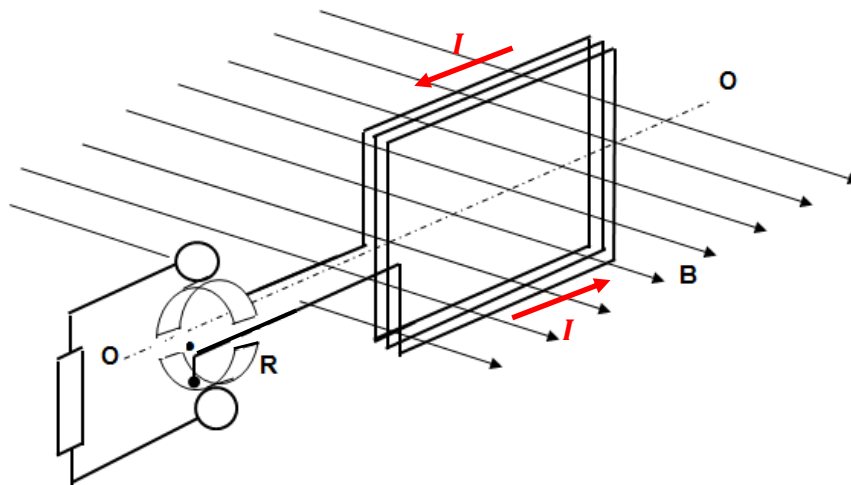


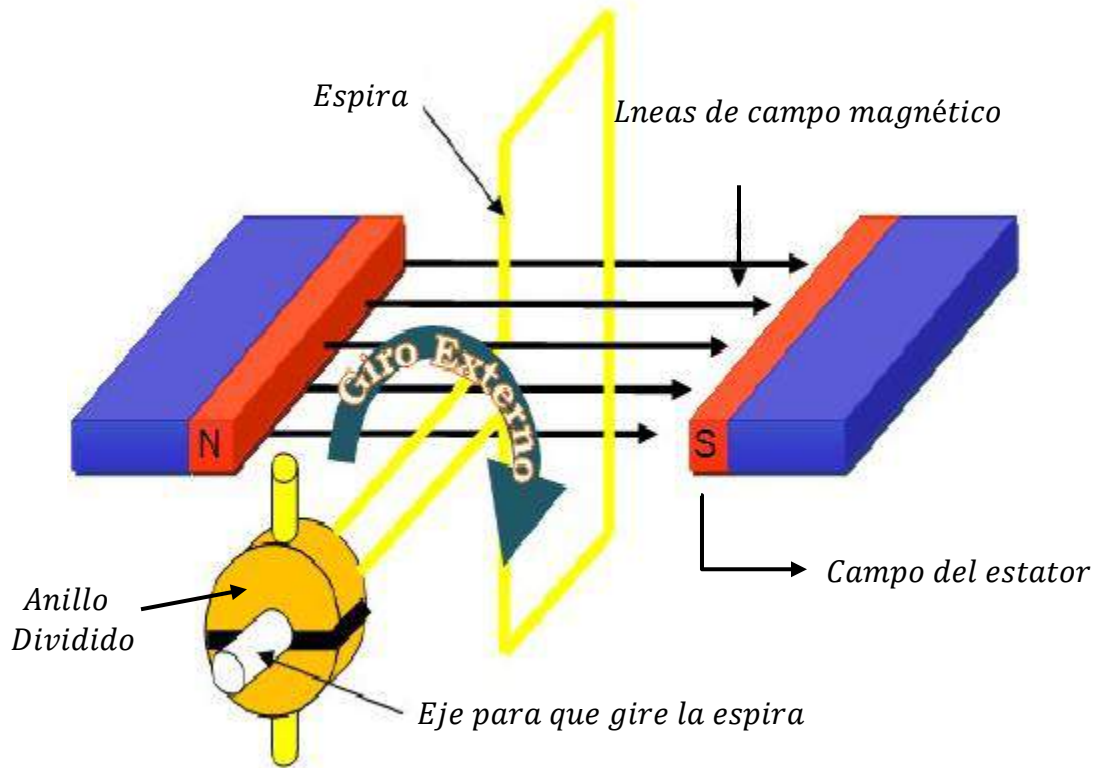
11.1.4 Corriente Continua

La generación de corriente se hace de manera que se obtiene una onda senoidal, lo que no es conveniente para máquinas eléctricas que trabajen con CC.

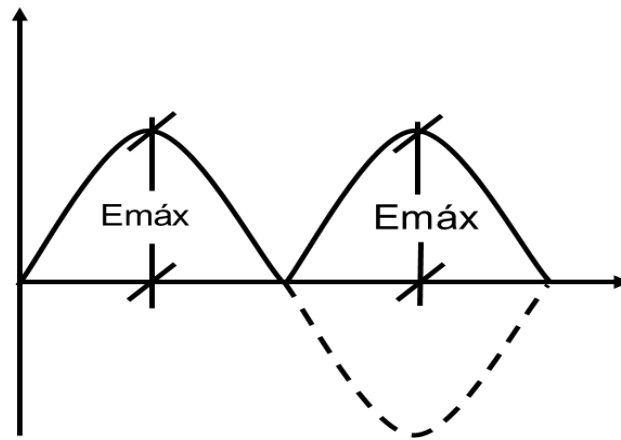
Si una bobina gira entre dos polos magnéticos fijos, la corriente en la bobina circula en un sentido durante la mitad de cada revolución, y en el otro sentido durante la otra mitad.

Para producir un flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En los generadores antiguos esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una bobina. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contacto con el conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su sentido dentro de la bobina. Así se producía un flujo de corriente de un sentido en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando rectificadores de diodos semiconductores o tiristores. En la figura se muestra un generador de corriente directa.



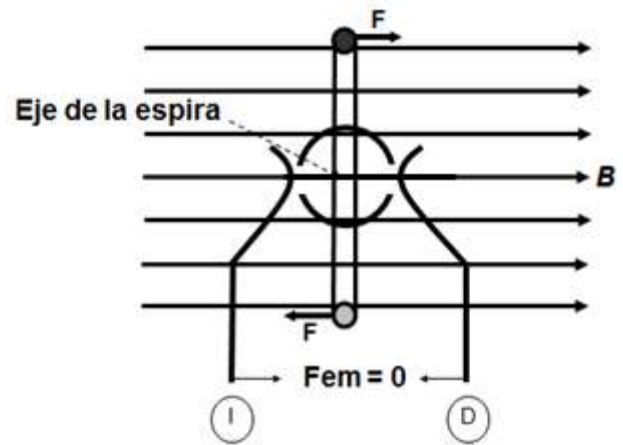


La fem que se obtiene es de un solo sentido pero pulsante:

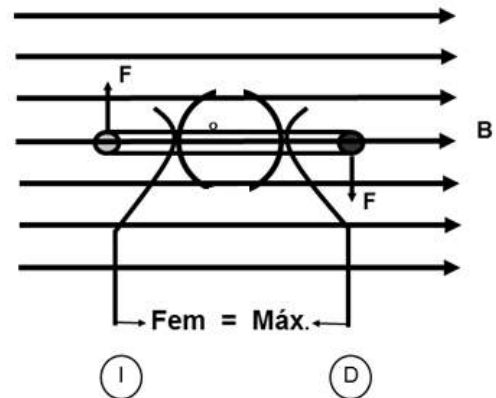


La conmutación para que los semiciclos tengan siempre el mismo sentido, se produce cuando la fem inducida se invierte. Para demostrarlo, recuérdese la expresión obtenida de la fem inducida: $e = E_{máx} \text{ sen } wt$

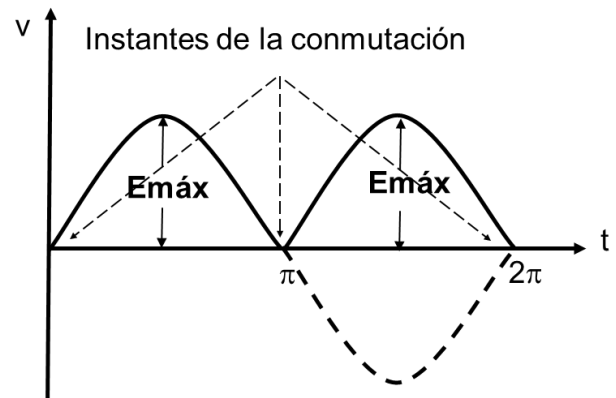
En ella, cuando el ángulo que forman la fuerza y el campo magnético es nulo, es decir $\omega t = 0^\circ$, la tensión es nula.



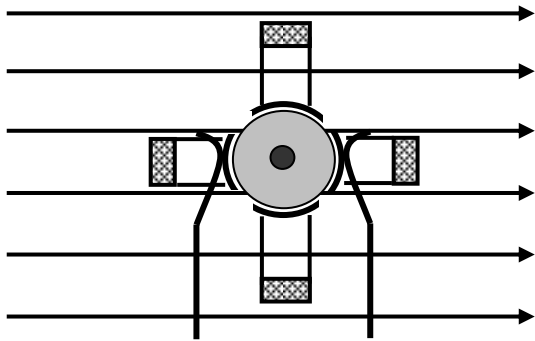
Cuando el ángulo que forman la fuerza y el campo magnético es de 90° , es decir $\omega t = 90^\circ$, la tensión es máxima



Del análisis de las figuras precedentes, se observa que cuando la espira es perpendicular al campo B, las escobillas reciben 0 Volt, denominando a esta operación conmutación porque se produce la inversión de la función en el instante en que la tensión es nula, y un pequeño ángulo después la escobilla (I) (izquierda), queda conectada a la mitad superior y la (D) (derecha) a la mitad inferior y esto hace que la tensión senoidal salga en el mismo sentido que la anterior, entregando una corriente continua y pulsante



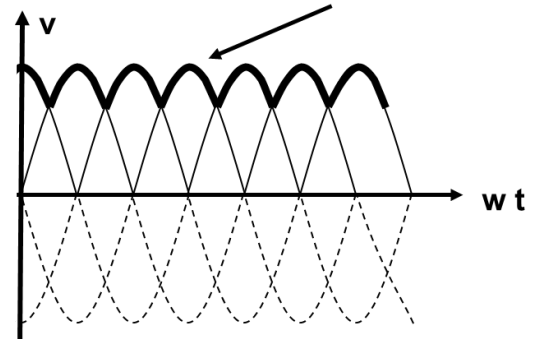
En los generadores reales, se colocan varias bobinas decaladas algunos grados entre ellas, y cada extremo de cada una va conectada a dos porciones de anillo colocados a 180° entre sí :



En esta figura se han colocado solamente dos bobinas a 90°. Al dispositivo que soporta a los semianillos, se lo denomina colector y a los semianillos delgas.

En la siguiente figura se expone la salida del generador elemental con dos cuadros o bobinas decaladas 90°, la envolvente es la CC. Nótese que por cada vuelta del conjunto de bobinas se generan dos senoides decaladas a 90° cada una, o sea que en los 360° mecánicos se generan dos ciclos completos, observando que por la disposición del colector la salida es la corriente continua pulsante

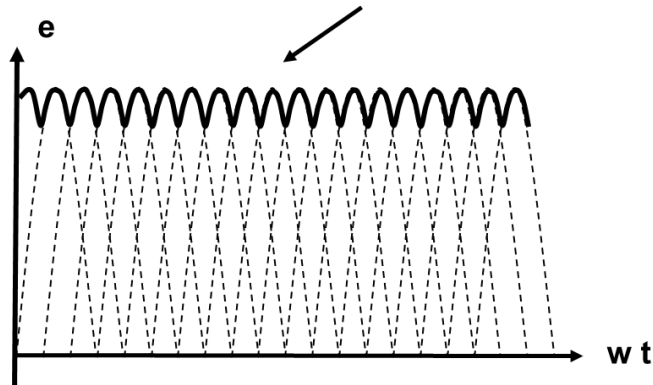
La envolvente es la salida que se obtiene entre las escobillas.



Si se colocaran más bobinas la envolvente es prácticamente una corriente continua ideal. En realidad, lo que hace el colector es rectificar a la corriente alterna.

En la siguiente figura, se observa la salida del generador conformada por la envolvente que se corresponde con los máximos de cada semi-senoide, ya que cuando cada bobina es paralela al campo magnético, la tensión en ella es máxima y ese valor es el que toman las escobillas. La tensión que generan estas máquinas, denominadas dínamo, es prácticamente una corriente continua pura.

La envolvente es la salida que se obtiene entre las escobillas.

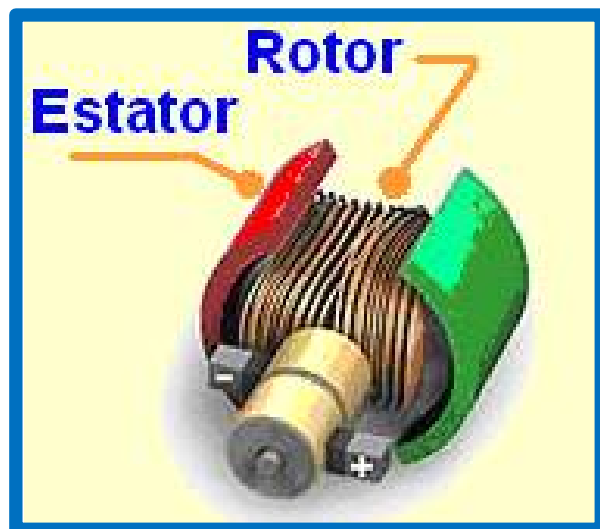


11.1.5 Componentes del generador.

En cualquier caso de generadores grandes o pequeños se distinguen dos partes principales, las cuales a su vez involucran a más piezas, y son: **Rotor** y **Estator**.

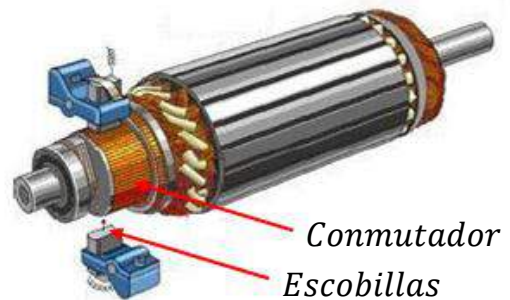
El denominado **Rotor**, es la parte en movimiento y se le denomina también armadura. Cuando se trata de máquinas pequeñas esta es la parte que se encarga de producir la energía eléctrica, mientras que para las máquinas de grandes proporciones es la que se encarga de producir el campo magnético.

El denominado **Estator** es la parte "quieta", estática de la máquina. Cuando se trata de máquinas pequeñas esta es la parte que se encarga de producir el campo magnético, mientras que para máquinas de grandes proporciones es la que se encarga de producir la energía eléctrica.

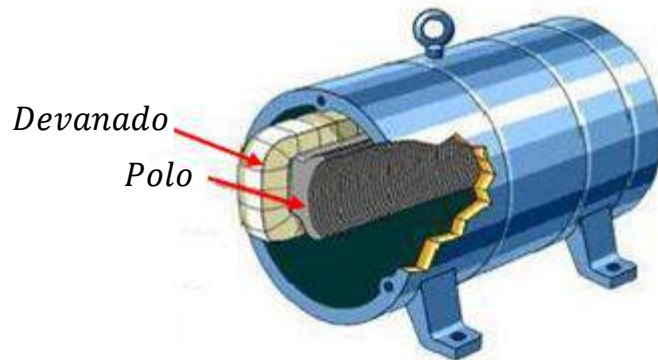


Cabe mencionar que para máquinas pequeñas el campo magnético puede ser creado por un imán natural (hierro magnético) mientras que para máquinas grandes el campo magnético se crea artificialmente arrollando conductor de cobre en hierro magnético haciendo pasar una corriente eléctrica por él.

- Inducido o rotor: es el rotor con sus arrollamientos y el colector.

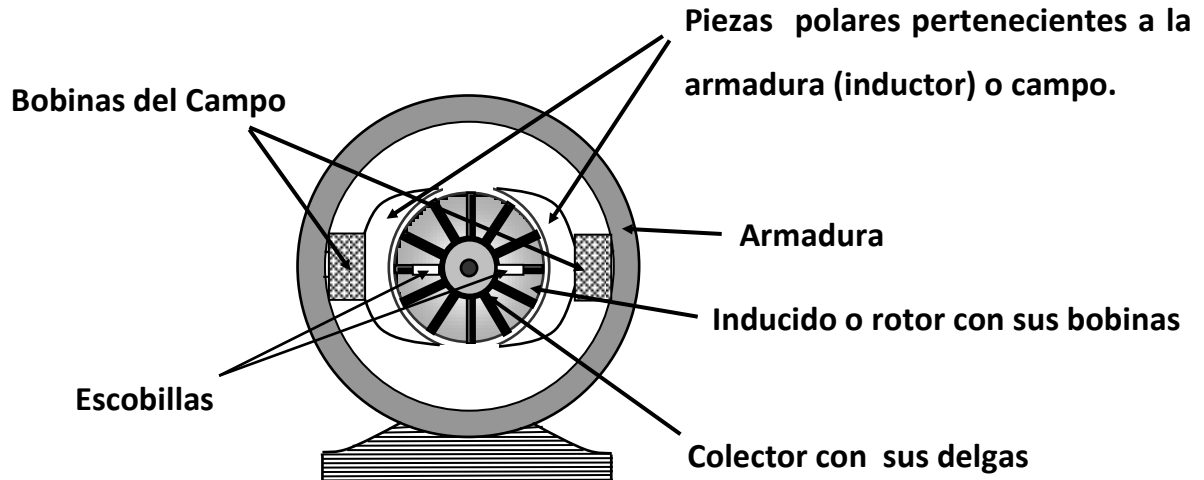


- Inductor, campo o excitación y también en algunos casos, estator: es el campo magnético, que en todos los generadores se produce mediante una CC.



Ahora bien, para que el campo magnético sea efectivo en el inducido, los arrollamientos se ubican sobre un núcleo de hierro dulce laminado, de tal forma que el campo esté obligado a seguir un camino de baja permeabilidad magnética y así aumentar el rendimiento del generador.

En la figura se esquematiza un generador real.



11.1.6 Preguntas de autoevaluación.

- 1) ¿ Qué tipo de corriente se obtiene en un generador básico ?
- 2) ¿ En qué elemento se extrae la corriente en el generador ?
- 3) ¿ Qué es el rotor y qué el estator ?
- 4) ¿ Cómo se obtiene CC en un generador ? Explique cómo se logra.
- 5) ¿ Con cuál mano se determina el sentido de circulación de la corriente en la espira ? Explique.

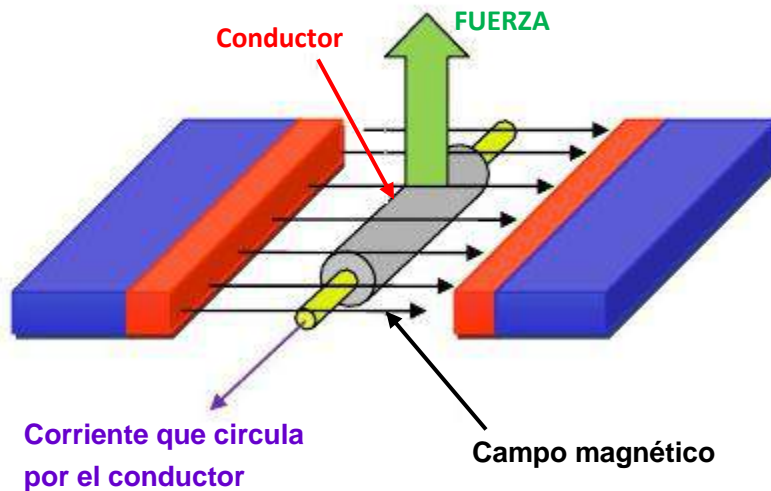
11.2 Motores

El motor eléctrico es la máquina más utilizada para transformar energía eléctrica en energía mecánica, pues combina las ventajas de la utilización de energía eléctrica (bajo costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de comando) con su construcción simple y robusta a bajos costos con gran versatilidad de adaptación a los más variados tipos de cargas.

- Los motores de corriente continua son motores con costo más elevado pues necesitan de una fuente de corriente continua, o de un dispositivo que convierta la corriente alterna en corriente continua. Este tipo de motor se utiliza en casos especiales.
- Los motores de corriente alterna son los más utilizados, porque la distribución de energía eléctrica es hecha en corriente alterna.

11.2.1 Conceptos generales de los motores eléctricos.

Los motores eléctricos operan bajo el principio de que un conductor colocado dentro de un campo magnético experimenta una fuerza cuando una corriente circula por el mismo como se ve en la figura. El principio de funcionamiento de un motor se basa en la ley de Laplace.



La magnitud de la fuerza varía directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula por el conductor, de acuerdo con la expresión:

$$F = I \cdot B \cdot L$$

11.2.2 Fuerza electromagnética ejercida sobre un cable conductor.

Si un cable conductor es recorrido por una corriente eléctrica de intensidad (I) cuando está en presencia de un campo magnético (B), aparece una fuerza sobre el conductor cuyo valor es.

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \text{sena}$$

Dónde: $F = \text{fuerza en Newtons}$

$I = \text{corriente en circulación}$

$B = \text{flujo magnético } \frac{\text{Weber}}{\text{m}^2} \text{ o Tesla}$

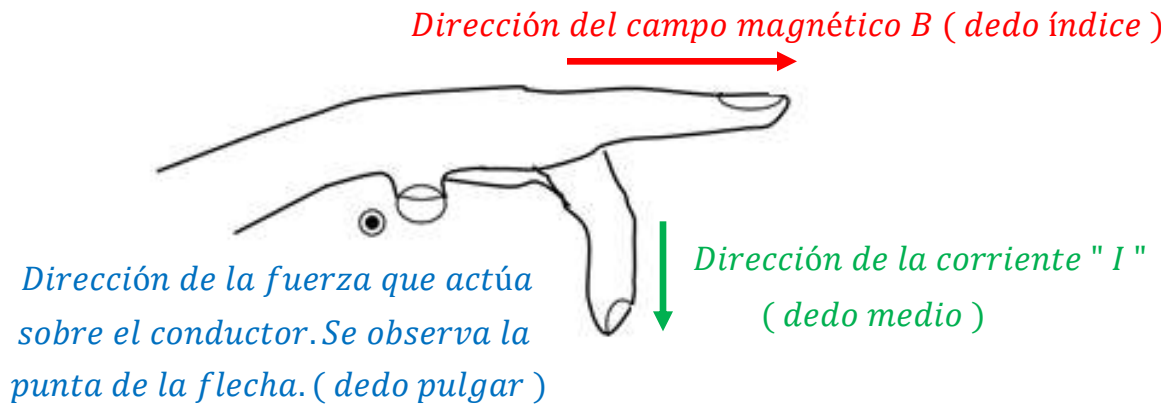
$L = \text{longitud del conductor en metros}$

$\alpha = \text{ángulo que forma el conductor y la dirección del campo magnético}$

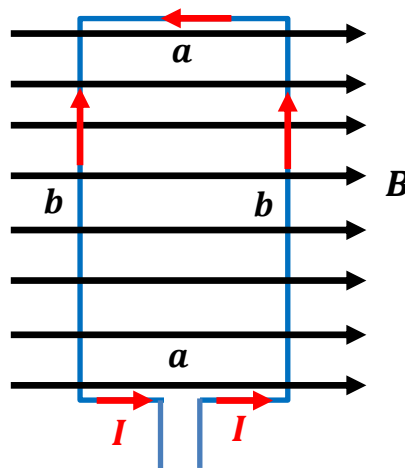
En el caso que hubieran N cables en presencia de un campo magnético, la fuerza magnética inducida será la fuerza en un cable multiplicado por N, la fórmula será entonces:

$$F = N \cdot B \cdot l \cdot I \cdot \text{sena}$$

En la figura siguiente se ve la regla de la mano izquierda que permite determinar el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor.



Ya hemos visto cómo es la fuerza que aparece sobre un hilo conductor recorrido por una corriente I , que está presente en un campo B , pero... ¿Cómo será en una espira?



Sea B un campo de inducción magnético que actúa sobre una espira que es recorrida por una corriente eléctrica de intensidad I . ¿Qué pasará? Es de esperar que surjan fuerzas sobre la espira, pero, ¿Cómo serán? Recurriremos a la expresión:

$$F = B \cdot L \cdot I \cdot \text{sen } \alpha$$

La figura representa a la espira rectangular (color azul) cuyos lados miden " a " y " b " y es recorrida por una corriente de intensidad " I " tal como indica el sentido de la flecha en la figura.

La espira está situada en una región en la que hay un campo magnético uniforme " \mathbf{B} " que está en el mismo plano que la espira, tal como indica la flecha de color negro en la figura. Calcularemos la fuerza que ejerce dicho campo magnético sobre cada uno de los lados de la espira rectangular, como si fuesen cuatro conductores diferentes.

Lados "a": Como la dirección de campo \mathbf{B} coincide con la dirección del conductor, en un lado tiene el mismo sentido y en el otro sentido contrario, (no es lo mismo la dirección que el sentido), ambas magnitudes forman un ángulo nulo (0°) o 180° . La longitud del conductor es $L = a$. Por ello la fuerza en ambos lados "a" es:

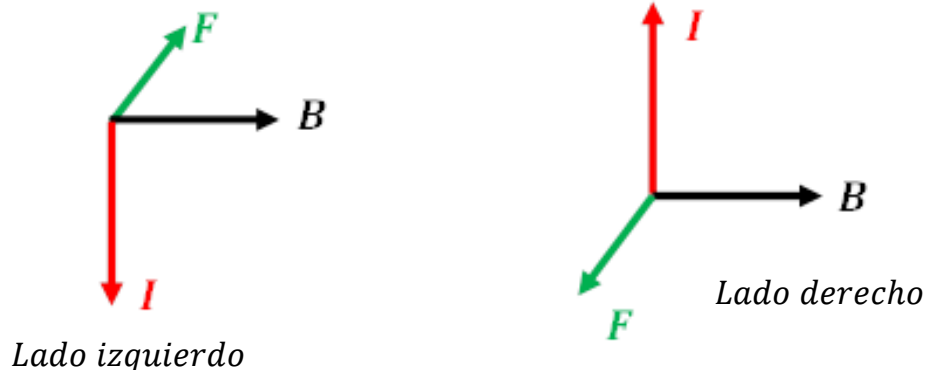
$$F = B \cdot a \cdot I \operatorname{sen} \alpha = B \cdot a \cdot I \operatorname{sen} 0^\circ = 0$$

$$F = B \cdot a \cdot I \operatorname{sen} \alpha = B \cdot a \cdot I \operatorname{sen} 180^\circ = 0$$

Lados "b": Como la dirección del campo \mathbf{B} es perpendicular a la dirección del conductor, ambas magnitudes forman un ángulo de 90° . La longitud del conductor es $L = b$. Por ello la fuerza en ambos lados " b " es:

$$F = B \cdot b \cdot I \operatorname{sen} \alpha = B \cdot b \cdot I \operatorname{sen} 90^\circ = B \cdot b \cdot I$$

$$F = B \cdot b \cdot I \operatorname{sen} \alpha = B \cdot b \cdot I \operatorname{sen} 180^\circ = -B \cdot b \cdot I$$



Las fuerzas en los lados " b ", son de igual valor y empleando la regla de la mano derecha se puede comprobar que son de sentido contrario. Constituyen, pues, un par de fuerzas que hará que la espira gire alrededor de un eje imaginario paralelo a los lados " b " de la espira.

El momento de fuerzas es : $M = I . S . B \operatorname{sen} \alpha$

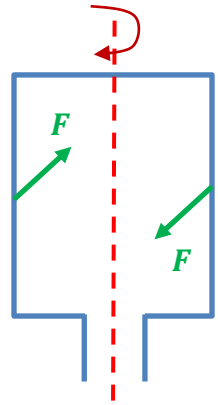
Dónde $M =$ momento de fuerzas o par motor (Newton . metro)

$I =$ intensidad de corriente (A)

$S =$ Superficie de la espira (m^2)

$B =$ Inducción de campo magnético (Tesla)

$\alpha =$ ángulo formado por la superficie de la espira y las líneas de campo magnético

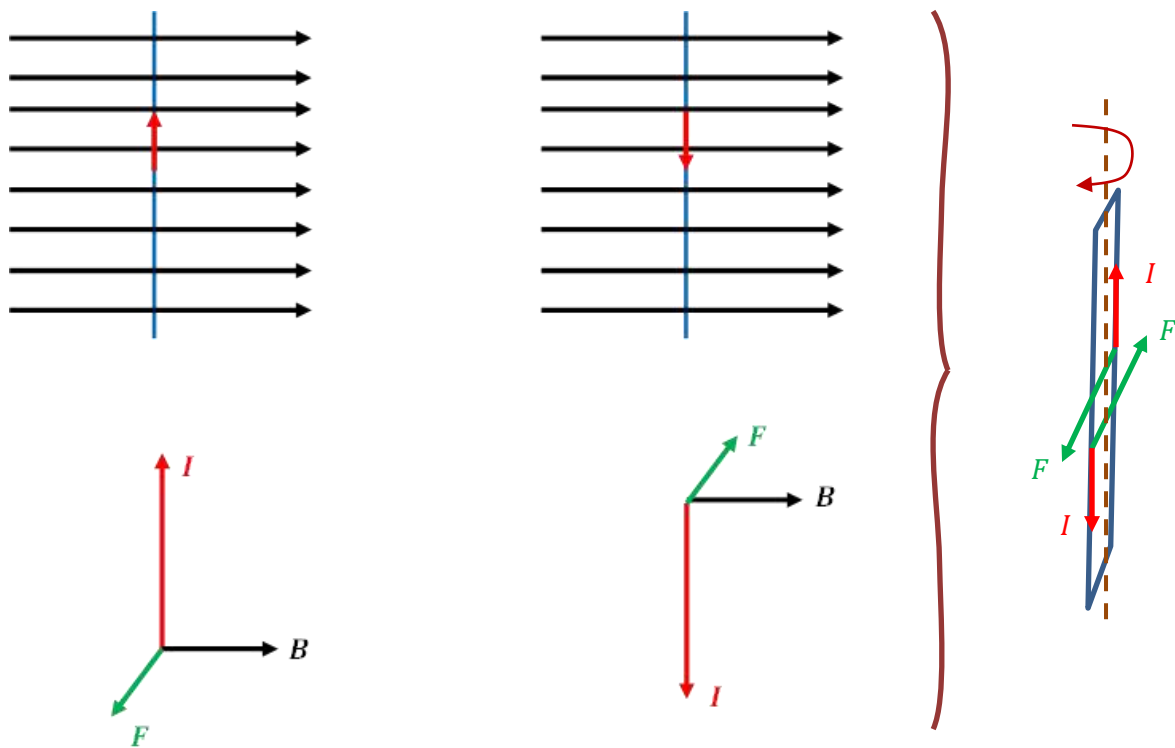


En general el rotor de un motor eléctrico queda dentro del campo magnético creado por el estator. Se induce una corriente dentro del rotor y la fuerza resultante (y por lo tanto el par) produce la rotación.

Si en lugar de una espira tenemos una bobina formada por N espiras, el par-motor será:

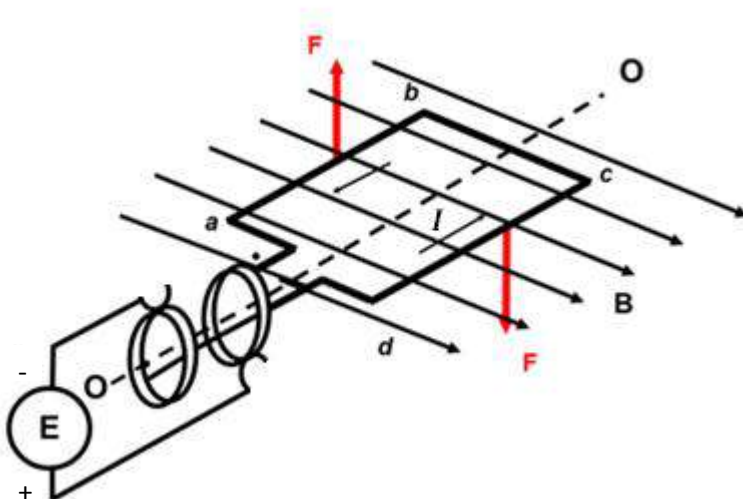
$$M = N . I . S . B \operatorname{sen} \alpha$$

Cuando la espira gira un ángulo próximo a 90° ambas fuerzas siguen existiendo ya que la corriente y el campo magnético no han cambiado. Lo que sí ha disminuido es la distancia entre ambas fuerzas disminuyendo el par.



En el instante en que la espira ha girado 90° ambas fuerzas tienen la misma dirección (están sobre la misma recta de acción) por lo que el par se anula (distancia cero).

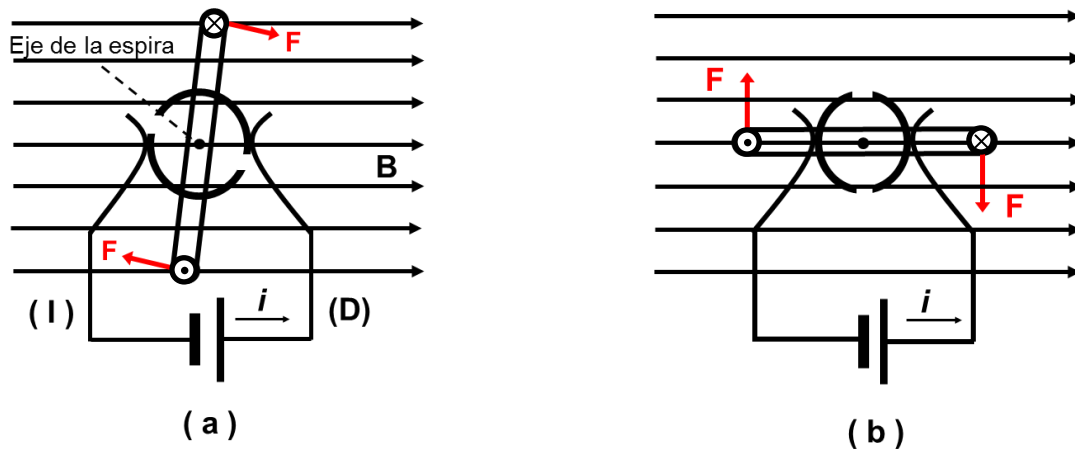
En la siguiente figura se observa una espira que gira sobre un eje $O - O$ adentro de un campo magnético B . En dicha bobina se introduce una corriente I mediante el generador E de CC.



Un extremo del cuadro va conectado a un anillo conductor (delga) y el otro a otro anillo. Sobre ellos apoyan sendas escobillas que van conectadas a un generador de CC, con las polaridades que se observan en el dibujo.

Las espiras al dar media vuelta encuentran que el sentido de la corriente es inverso por lo que aparecerá una cupla inversa, imposibilitando a este motor elemental a continuar girando.

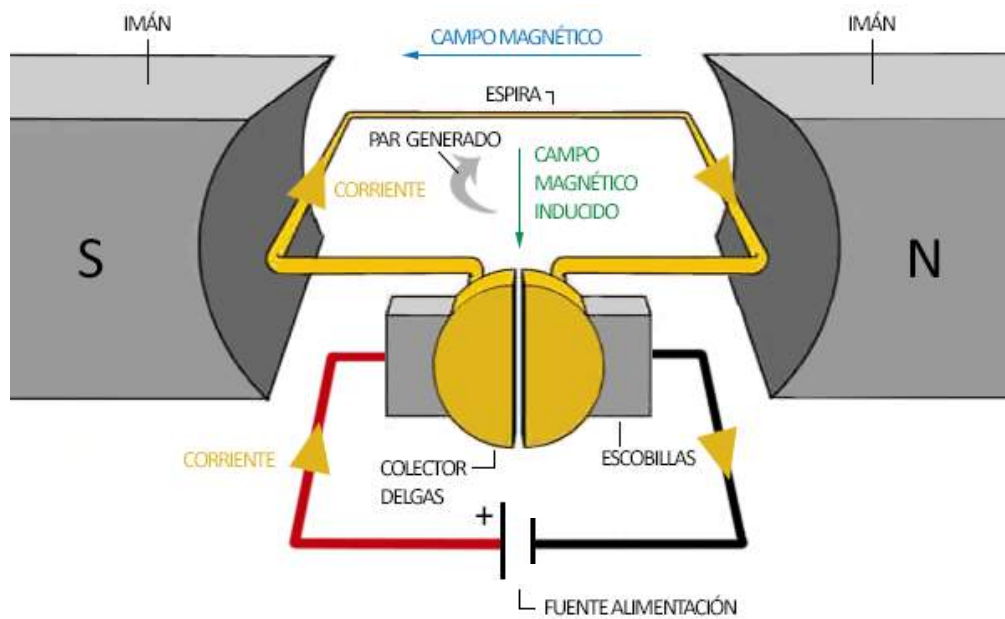
Se debe lograr que en la rama " d- c " de la derecha siempre la corriente suba y en el lado " b -a " de la izquierda la corriente baje. Para ello se coloca un solo anillo seccionado en dos similar al generador. Con ello cada vez que el cuadro de media vuelta, se encuentra nuevamente con el mismo sentido de la corriente y la cupla posee también la misma dirección por lo que el cuadro comienza a girar. La inercia que trae la bobina hace que siga girando en el mismo sentido.



En la figura se ha esquematizado la posición de las delgas (semi anillos) y además se indica la circulación de la corriente. En el esquema (a) se observa que la delga superior (D) ha comenzado a rozar la escobilla correspondiente al lado superior del cuadro y la corriente que circula por dicha espira de tal forma que se observa en el corte de ella la corriente que se dirige en forma perpendicular al papel, hacia adentro, representada por la cola de una flecha indicadora del sentido de la misma. En la otra mitad de la espira se puede observar que la corriente sale.

En el cuadro, inmediatamente sale de la posición perpendicular al campo, aparece una cupla que lo obliga a girar, figura (a).

Dicha cupla es máxima en la posición paralela del cuadro al campo figura (b). Por influencia de la fuerza, el cuadro continua girando hasta llegar al instante anterior al representado en la figura (a). Por inercia, el cuadro continúa girando y se produce la conmutación que hace que la corriente tenga el sentido que se expone en ella.



11.2.3 Potencia y par de un motor eléctrico.

La potencia mecánica de los motores se expresa en caballos de fuerza (HP) o Kilowatts, medidas que cuantifican la cantidad de trabajo que un motor eléctrico es capaz de realizar en un periodo específico de tiempo. Dos factores importantes que determinan la potencia mecánica en los motores son: el par y la velocidad de rotación.

El par es una medida de la fuerza que tiende a producir la rotación, se mide en Newton-metro o Libras-pie. La velocidad del motor se establece comúnmente

en revoluciones por minuto (RPM). La relación entre la potencia, el par y la velocidad se da por la siguiente expresión:

$$Potencia = Velocidad \cdot Par$$

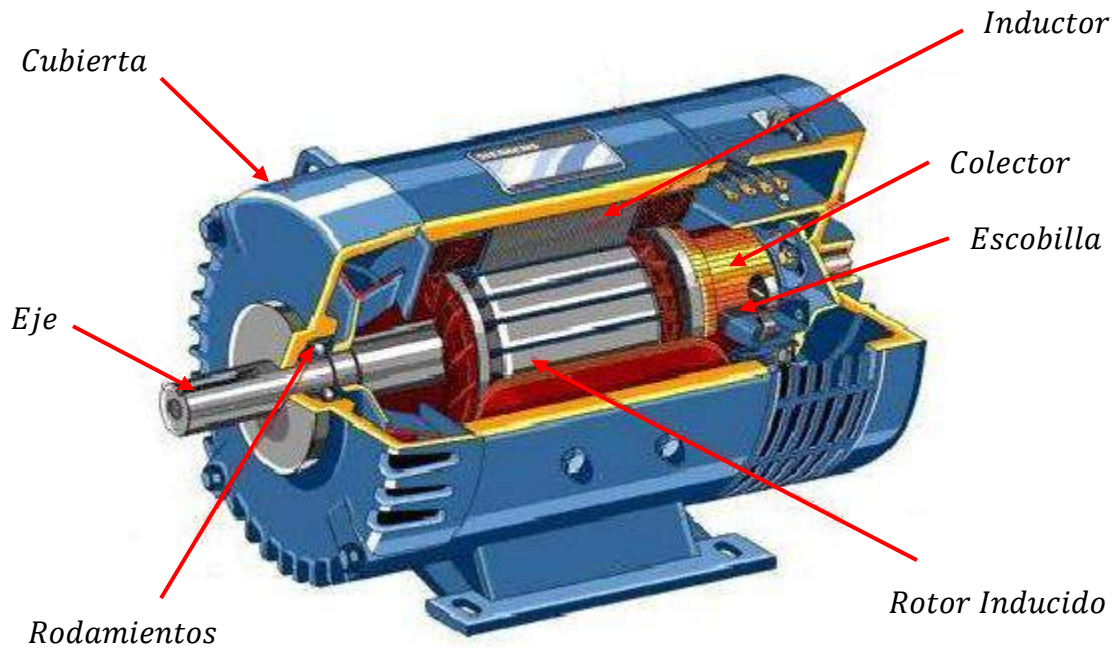
A menor velocidad existe mayor par para entregar la misma potencia, entonces los motores de baja velocidad necesitan componentes más robustos que los de alta velocidad para igual potencia nominal.

11.2.4 Motores eléctricos de Corriente Continua.

Un motor CC está compuesto principalmente por el rotor y el inductor que a su vez se componen de:

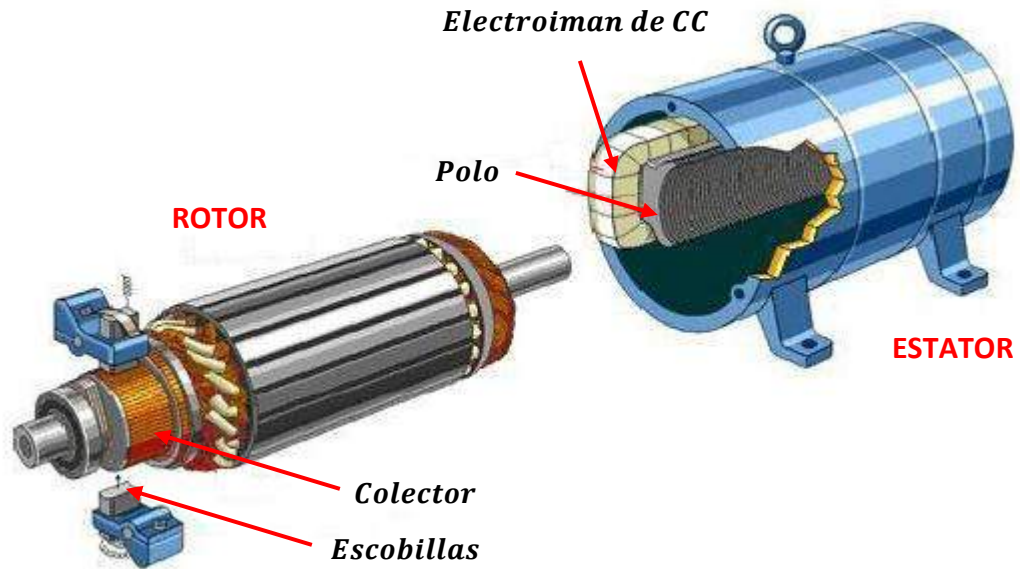
- Un imán fijo que constituye el inductor
- Un bobinado denominado inducido que es capaz de girar en el interior del primero, cuando recibe una CC.
- Escobillas: cuya función es la de transmitir la corriente proveniente de la fuente CC al colector o conmutador. Las escobillas son de grafito, material menos duro que el del conmutador, con el fin de evitar el desgaste del mismo. Debido a que el acercamiento de las escobillas al conmutador debe ser continuo para evitar las chispas entre una conmutación y otra, las escobillas poseen un sistema de resortes que proveen la presión suficiente para generar un contacto adecuado entre estas y el conmutador.
- El colector o conmutador es un conjunto de láminas (delgas) que van montadas sobre el rotor, separadas entre sí y del eje por medio de materiales aislantes para evitar el contacto eléctrico con estos. Su función es la de mantener la corriente que viene de las escobillas en un flujo unidireccional y comunicándola de esta manera al inducido.

- Eje que tiene como responsabilidad ser la parte móvil del rotor y sobre el que van montados: el inducido, el colector o conmutador y el núcleo del inducido. Para facilitar su movimiento giratorio está soportado sobre cojinetes.

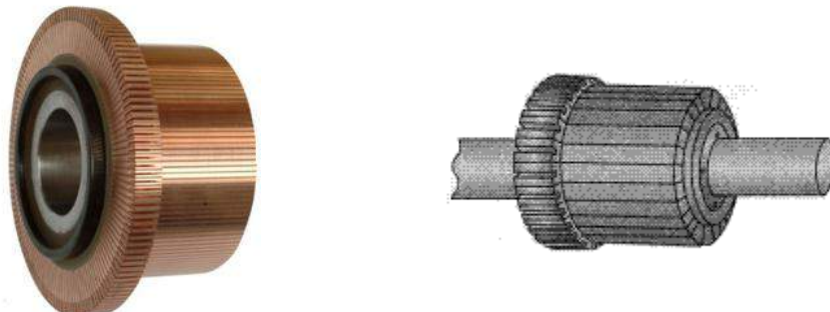


Generalmente los motores CC tienen la disposición de montaje que se muestra en la próxima figura, donde es posible apreciar las dos partes más importantes del motor CC que son el rotor y el inductor. El rotor es una pieza giratoria cilíndrica, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado de hilo de cobre por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente. También se ve en esta figura uno de los polos del imán que poseen este tipo de motores y que es el responsable del campo magnético. Además se aprecia la forma mecánica en la que las escobillas entran en contacto con las delgas del conmutador que gira con el rotor y se esquematiza de manera sencilla los

resortes usados con el fin de mejorar el contacto y evitar las chispas por mal contacto entre el conmutador y el rotor.



Otro elemento importante y fundamental del motor eléctrico de corriente continua es el colector de delgas, que es un conjunto de láminas de cobre, aisladas entre sí y que giran solidariamente con el rotor. Las delgas están conectadas eléctricamente a las bobinas del devanado inducido y por medio de ellas dicho devanado se puede conectar a la fuente de energía eléctrica del exterior. Cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de dos bobinas del devanado inducido, de tal forma que habrá tantas delgas como bobinas simples posea el devanado. Al colector de delgas también se le conoce como conmutador.

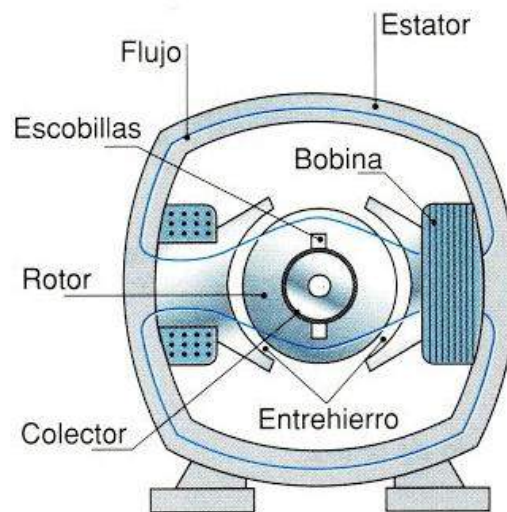


Escobillas: Las escobillas permanecen fijas al estator, sin realizar movimiento alguno, y están en contacto permanente sobre la superficie del colector de delgas. Esto permite el paso de corriente eléctrica desde el exterior hasta el devanado inducido del rotor. Las escobillas y el colector de delgas permiten la conmutación de corriente cada media vuelta del rotor.

11.2.4.1 Desde el punto de vista del tipo de corriente eléctrica pueden ser:

- De corriente continua
- De corriente alterna: síncronos y asíncronos

Para permitir el movimiento del rotor, entre rotor y estator, existe un espacio de aire llamado entrehierro, que debe ser lo más reducido posible para evitar pérdidas del flujo magnético.



11.2.4.2 Desde el punto de vista electromagnético se pueden considerar constituidos por:

- Un conjunto magnético .

- Dos circuitos eléctricos: uno en el rotor y otro en el estator.

11.2.4.3 Definiciones

Devanado o bobinado: hilo de cobre arrollado que forma parte de los circuitos eléctricos de las máquinas.

Uno de los devanados de uno de los circuitos eléctricos produce el flujo que se establece en el conjunto magnético cuando es recorrido por la corriente eléctrica, es el devanado inductor o excitador. En el otro devanado, perteneciente al segundo circuito eléctrico se induce una fuerza que provoca un par-motor en el caso de un motor eléctrico, este es el devanado inducido.

Devanado (o bobinado) inductor: Es el devanado (circuito eléctrico) que genera el campo magnético de excitación en una máquina eléctrica. Se sitúa en el interior del estator en número par en unos salientes llamados polos. En todo circuito magnético, como se sabe se distinguen los polos norte, de donde salen las líneas de fuerza del campo de inducción magnética (B), y los polos sur, por donde entran dichas líneas. Siguiendo el circuito magnético de los motores de corriente continua se observan núcleos de hierro rodeados por bobinas (devanados) que se conocen como polos, que van incrustados por uno de sus extremos en una pieza de hierro llamada culata o expansión polar, de manera que queda libre sólo el extremos de cada uno de ellos, que es precisamente el que da nombre al polo. En definitiva, los polos generan un campo magnético cuando circula corriente por ellos, un campo magnético inductor.

Devanado (o bobinado) Inducido: Es el devanado sobre el que se inducen las fuerzas electromotrices. Se sitúa en unas ranuras del rotor.

Antes de enumerar los diferentes tipos de motores, conviene aclarar un concepto básico que debe conocerse de un motor: el concepto de funcionamiento con carga y funcionamiento en vacío.

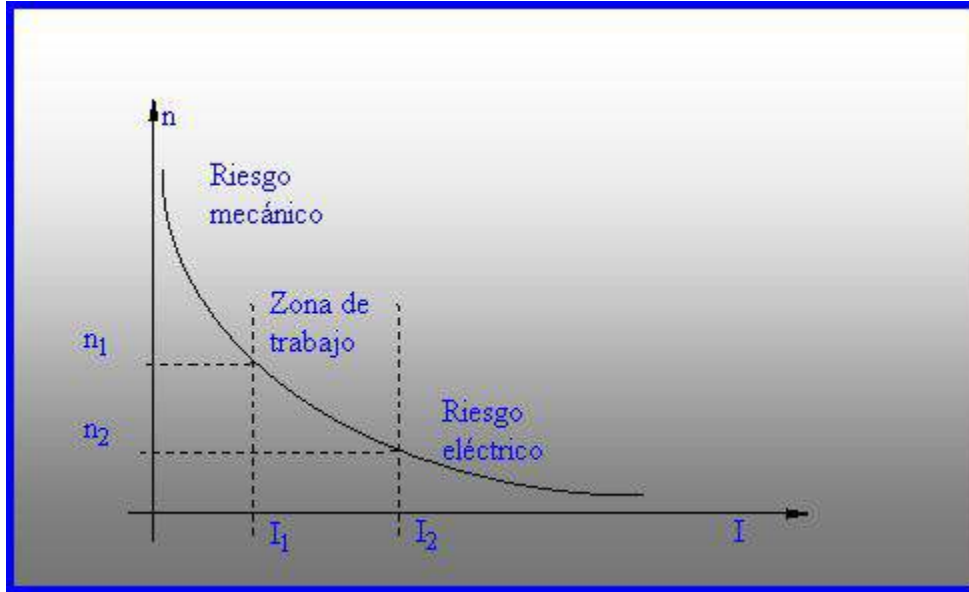
- Un motor funciona con carga cuando está arrastrando cualquier objeto o soportando cualquier resistencia externa (la carga) que le obliga a absorber energía mecánica. Así pues, en este caso, el par resistente se debe a factores internos y externos. Por ejemplo: una batidora encuentra resistencia cuando bate mayonesa; el motor de una grúa soporta las cargas que eleva, el propio cable, los elementos mecánicos propios de la grúa,..., etc.
- Un motor funciona en vacío, cuando el motor no está arrastrando ningún objeto, ni soportando ninguna resistencia externa. El eje está girando libremente y no está conectado a nada. En este caso, el par resistente se debe únicamente a factores internos.

El giro del rotor (revolución) induce una tensión en las bobinas del mismo. Esta tensión es opuesta en la dirección a la tensión de alimentación que se aplica a el rotor, y de ahí que se conozca como voltaje inducido o fuerza contra electromotriz.

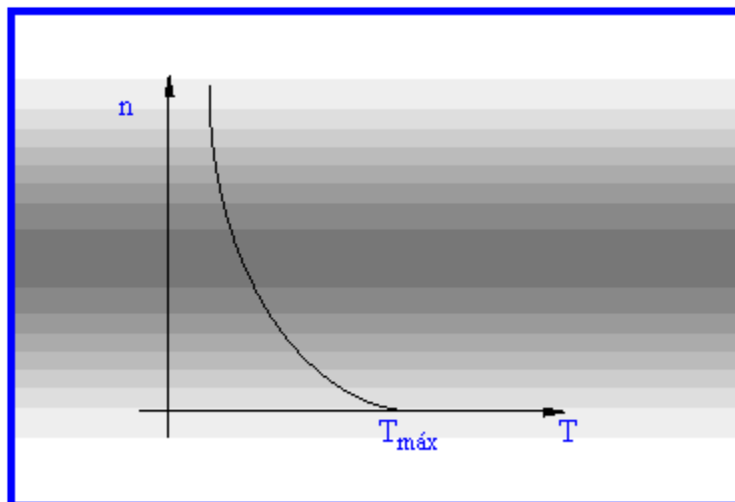
Cuando el motor gira más rápido, esta tensión inducida aumenta hasta que es casi igual a la de alimentación. La corriente entonces es pequeña, y la velocidad del motor permanecerá constante siempre que el motor no esté bajo carga y tenga que realizar otro trabajo mecánico que no sea el requerido para mover el rotor. Bajo carga, el rotor gira más lentamente, reduciendo el voltaje inducido y permitiendo que fluya una corriente mayor en el rotor. El motor puede así recibir más potencia eléctrica de la fuente, suministrándola y haciendo más trabajo mecánico.

Debido a que la velocidad de rotación controla el flujo de la corriente en el rotor, deben usarse aparatos especiales para arrancar los motores de corriente continua. Cuando el rotor está parado, ésta no tiene realmente resistencia, y si se aplica el voltaje de funcionamiento normal, se producirá una gran corriente, que podría dañar el conmutador y las bobinas del rotor. El medio normal de prevenir estos daños es el uso de una resistencia de encendido conectada en serie con el rotor, para disminuir la corriente antes de que el motor consiga

desarrollar el voltaje inducido adecuado. Cuando el motor acelera, la resistencia se reduce gradualmente, tanto de forma manual como automática.



Esta es la característica más importante de este motor. Cuando no hay resistencia (par pequeño) el motor se puede embalar, no debe trabajar en vacío. El motor tiene el máximo par en el momento del arranque. Si la carga es mucha el motor se puede parar.



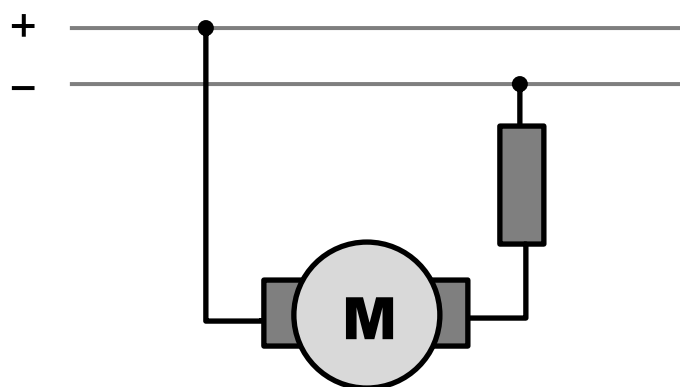
11.2.4.4 Conexiones del motor de corriente continua

Las conexiones que se pueden realizar en un motor son tres:

- Serie.
- Paralelo.
- Compound (excitación compuesta).

11.2.4.5 Excitación Serie

Como se puede observar en el dibujo el devanado de excitación se encuentra conectado en serie con el inducido.



Si esta se desconecta de los bornes de salida del motor, quedara interrumpido el circuito de excitación y por lo tanto no se producirá en el inducido tensión alguna. La tensión aplicada es constante, mientras que el campo

magnético de excitación aumenta con la carga, puesto que la corriente es la misma corriente de excitación. Al cargar el motor debe tomar más corriente para vencer el obstáculo a que gire su eje.

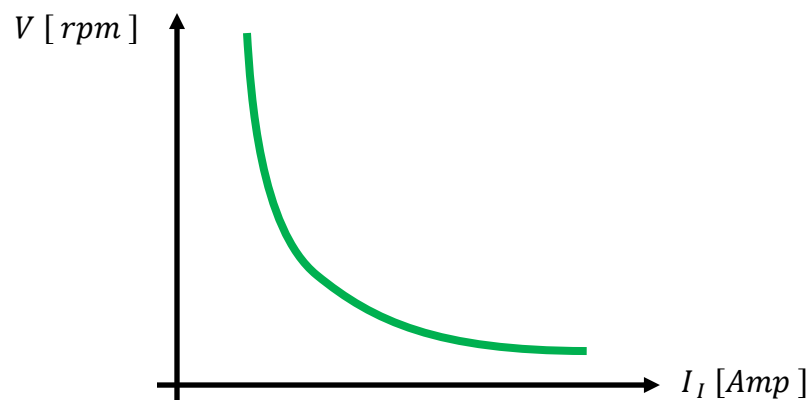
El flujo aumenta en proporción a la corriente en la armadura, como el flujo crece con la carga, la velocidad cae a medida que aumenta esa carga. El principal problema de esta conexión es que en el momento de arranque, la corriente que circula es muy elevada, debido a que el motor al estar detenido aún no ha creado la fuerza contra electromotriz, y la única resistencia que ofrece el conjunto es la del alambre de los devanados y ésta es MUY BAJA.

En el motor con excitación en serie tenemos que la intensidad de excitación es igual a la intensidad que circula por el inducido. Esta es su característica principal. El motor con excitación en serie es mejor arrancarlo con una carga ya que a bajas intensidades adquiere mucha velocidad de giro resultando arriesgado para el motor. Para que no ocasionen caídas de tensión elevadas en el devanado del inductor es preciso que tenga pocas espiras y además estas deben ser de hilo grueso, de lo contrario la velocidad sería muy pequeña.

Una taladro no podría tener un motor serie, ¿Por qué? Pues porque al terminar de efectuar el orificio en la pieza, la máquina quedaría en vacío (sin carga) y la velocidad en la broca aumentaría tanto que llegaría a ser peligrosa la máquina para el usuario

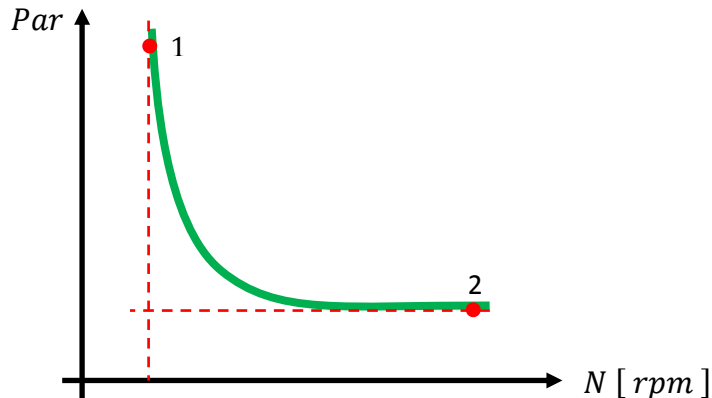
Sabiendo que el flujo de campo inductor es proporcional a la intensidad de excitación tenemos que el flujo magnético dependerá directamente de la intensidad de carga en el inducido.

La curva característica que representa la velocidad sería:



Se puede ver que a bajas intensidades la velocidad de giro se eleva peligrosamente. Sin carga la velocidad tiende a infinito.

Respecto al par motor es muy alto en el arranque debido a que tiene una elevada corriente de arranque. Respecto a la característica mecánica estudiaremos el siguiente diagrama:



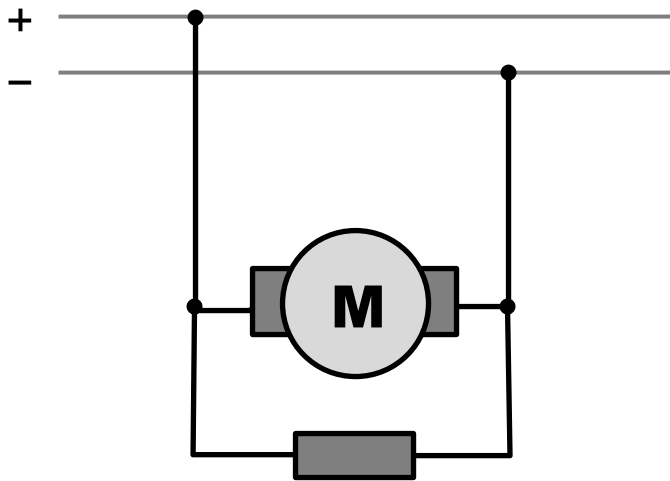
Cuando el par excede el punto 1 el motor no puede con la carga y tiende a pararse. Sin embargo cuando el par se encuentra por debajo del punto 2 el motor se acelera. Es decir al reducir la velocidad de giro el motor genera más par y una mayor potencia. Esta característica es muy útil en los medios de transporte eléctrico como locomotoras, tranvías, grúas, sillas de ruedas, etc. Si una persona en silla de ruedas debe subir por una rampa su motor desarrollará más par y por ello más potencia ya que disminuye su velocidad.

Las características más destacadas de este motor son:

- Gran par de arranque
- Velocidad variable con la carga aplicada a su eje
- No se daña fácilmente con sobrecargas.
- Se embala cuando funciona en vacío
- La potencia es casi constante a cualquier velocidad.

11.2.4.6 Autoexcitación Shunt o Paralelo.

Se conecta inductor e inducido en paralelo, conectados ambos a la tensión de alimentación.

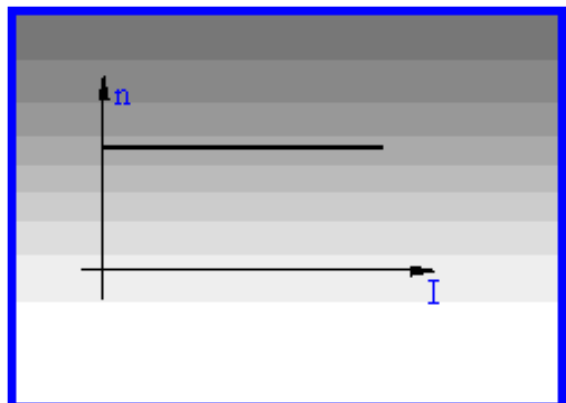


En este caso, cada devanado trabajará con una tensión constante, lo que hace que el flujo magnético del inductor o campo sea constante, traduciéndose esto último en que la velocidad permanece constante aunque varíe la carga mecánica.

Respecto al par motor tenemos que decir que mientras el flujo sea constante, el par es directamente proporcional a la corriente del inducido. Además el par motor lo podemos relacionar con la velocidad del motor, a esta relación se la llama característica del motor. Siendo esta característica la que mejor define el funcionamiento del motor con excitación en derivación o shunt, esto es así porque se puede calcular la velocidad de giro del motor necesaria para una determinada carga. Si se aumenta la carga aplicada al motor se obtiene una corriente del inducido mayor para poder producir un par de motor igual a la carga, lo que hace que este tipo de motor sea muy estable.

En el instante del arranque, el par motor que se desarrolla es menor que en el motor serie. Al disminuir la intensidad absorbida, el régimen de giro apenas sufre variación. Es el tipo de motor de corriente continua cuya velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta.

Los motores de corriente continua en derivación son adecuados para aplicaciones en donde se necesita velocidad constante a cualquier ajuste del control o en los casos en que es necesario un rango apreciable de



velocidades (por medio del control del campo).

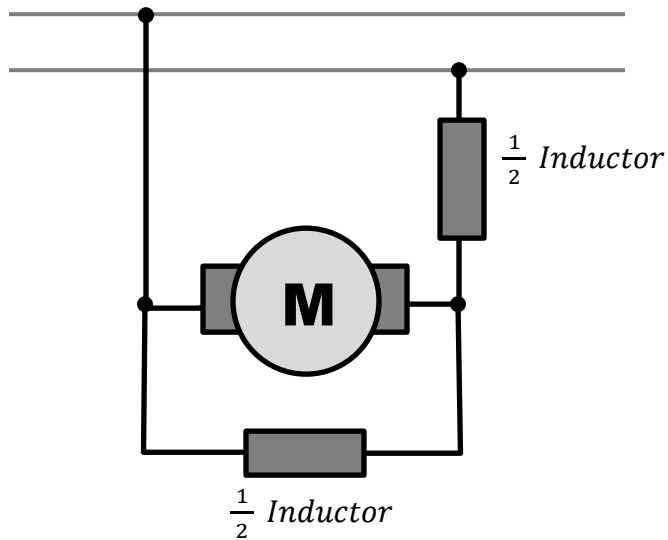
Este motor es usado en máquinas herramientas.

Sus características son:

- Débil par de arranque;
- No soportan bien las sobrecargas
- Velocidad constante casi independiente de la carga.

Sus principales aplicaciones son aquellas en donde es necesario variar la velocidad con par constante, como por ejemplo en las bombas de sangre para diálisis.

11.2.4.7 *Excitación Compound*



Un motor compound o motor de excitación compuesta es un motor eléctrico de corriente continua cuya excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados: inducido, inductor serie e inductor auxiliar. En este

tipo se tiene una combinación de la excitación serie y derivación (motor serie y paralelo) con lo que se logra combinar las buenas características de ambas conexiones. Para la realización de la misma se cuenta con un inductor o campo separado en dos arrollamientos, conectando uno de ellos en derivación y el otro en serie con el inducido, pero situado de tal manera que la corriente que circule por este semi devanado sea de sentido contrario a la que pasa por el otro.

Presentan características intermedias entre el motor serie y shunt, mejorando la precisión y estabilidad de marcha del paralelo y el par de arranque del serie y no corre el riesgo de embalsarse al perder la carga.

El flujo del campo serie varía directamente a medida que la corriente de armadura varía, y es directamente proporcional a la carga. El campo serie se conecta de manera tal que su flujo se añade al flujo del campo principal shunt. El motor compound es un motor de excitación o campo independiente con propiedades de motor serie. El motor da un par constante por medio del campo independiente al que se suma el campo serie con un valor de carga igual que el del inducido. Cuantos más amperes pasan por el inducido más campo serie se origina, claro está, siempre sin pasar del consumo nominal.

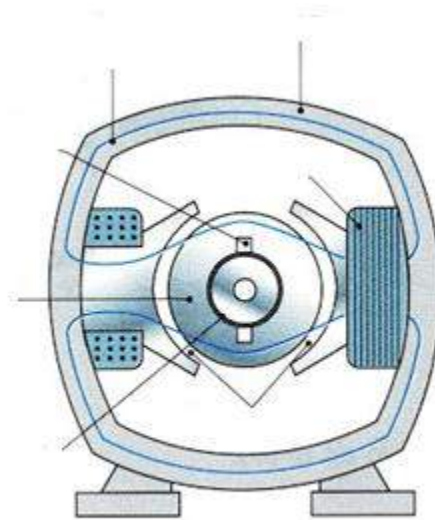
De esta forma se consigue :

- Velocidad constante para todas las cargas.
- Par bastante débil.

11.2.4.8 Preguntas de autoevaluación.

- 6) ¿Cuándo se utilizan los motores de corriente continua ?. Dar ejemplos de aplicación. ¿Se pueden transformar en generadores?.
- 7) ¿Cuáles son los dos circuitos de un motor de corriente continua?. Explique cada uno de ellos.
- 8) Explica la función que hacen los siguientes elementos de un motor eléctrico:
 - Imanes.
 - Electroimanes.
 - Colector
 - Escobillas.
- 9) ¿Qué es el rotor?¿Y el estator?

- 10) ¿Qué diferencias hay entre un imán y un electroimán?
11) Indique los elementos de un motor en la siguiente figura:

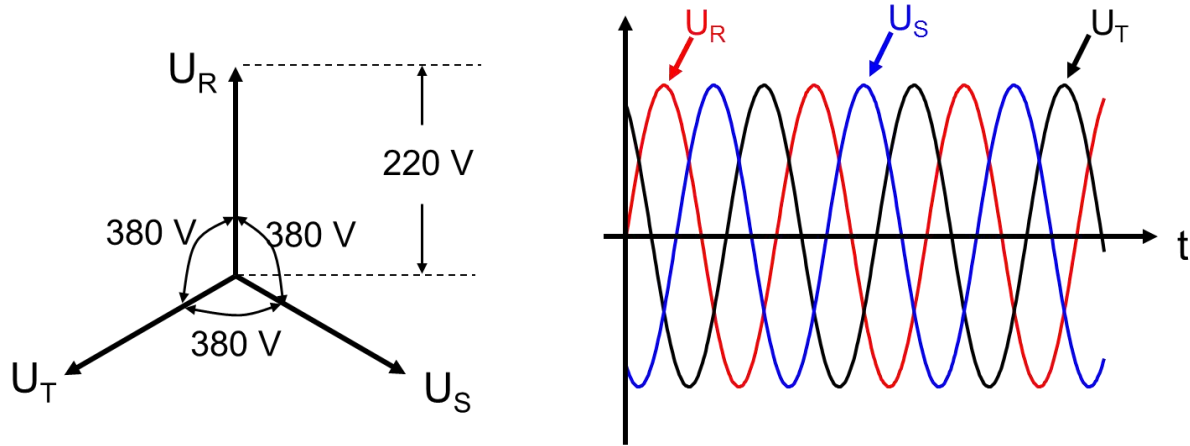


- 12) ¿ Por qué gira la bobina cuando circula corriente continua por ella en un motor ?
13) ¿ Con cuál mano se determina el sentido de giro de la espira ?
Explique.
14) Diga cómo se conectan los bobinados inductores en un motor serie.
15) Indique las características del motor serie. Ventajas y desventajas.
16) Diga cómo se conectan los bobinados inductores en un motor paralelo.
17) Indique las características del motor paralelo. Ventajas y desventajas.
18) Diga cómo se conectan los bobinados inductores en un motor compound.
19) Indique las características del motor compound. Ventajas y desventajas.

11.2.5 Motores eléctricos de Corriente Alterna

Las máquinas de corriente alterna son dispositivos que utilizan para su funcionamiento la tensión de las líneas de alimentación, tanto domiciliaria

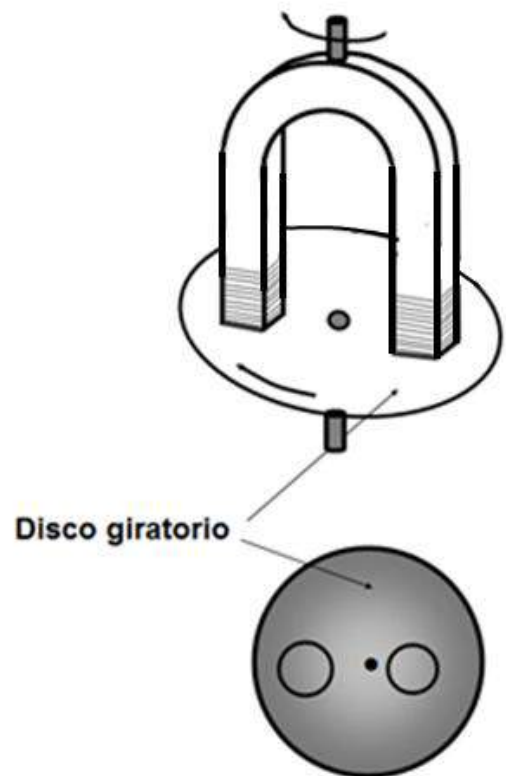
como industrial y que en la República Argentina es trifásica con una tensión entre fases de 220 Volt y entre líneas de 380 Volt y 50 Hz.



11.2.5.1 Máquinas de inducción: Motores Asíncronos

Este tipo de motor es uno de los más utilizados en infinidad de aplicaciones y se construyen para tensiones monofásicas de 220 Volt como para trifásica. Los monofásicos se fabrican para potencias máximas de hasta dos y tres HP. Para potencias mayores se utilizan los trifásicos y se pueden construir desde 3 HP hasta 400 o 500 HP.

En el uso doméstico tal como heladeras, lavarropas, aire acondicionado, ventiladores, etc, el motor utilizado es el monofásico



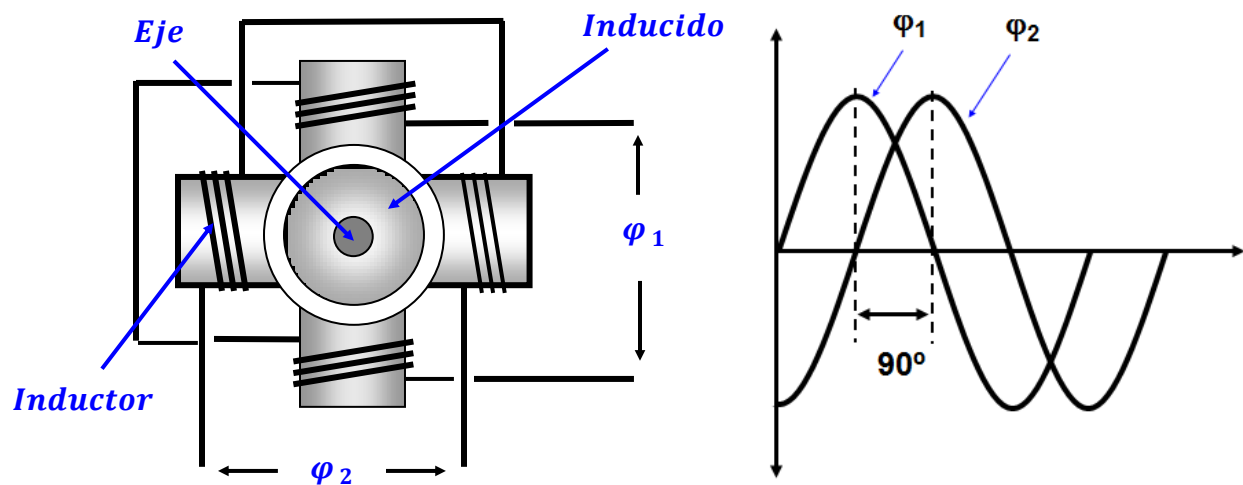
Su principio de funcionamiento está basado en los experimentos que Ferraris realizó en el año 1885. En la anterior figura se ha esquematizado dicho principio.

Se puede observar en la figura, un imán con sus respectivos polos, con un eje vertical que le permite girar sobre él. Por otro lado, en la misma dirección del eje, existe otro al cual va adosado un disco metálico que puede girar libremente. El imán no hace contacto con el disco pero está muy próximo a él. Al hacer girar el imán, se producen en el disco corrientes inducidas, las cuales recordando a la ley de Lenz tenderán a crear a su vez otro campo magnético que se oponga al que le dio origen. El efecto resultante es el giro del disco en el mismo sentido que el imán.

No obstante ello, en el instante que el disco alcanza la misma velocidad que el imán desaparecerán las corrientes inducidas sobre el mismo, con lo que se retrasará, lo que obligará a que aparezcan de nuevo dichas corrientes. De todo ello se obtiene el resultado de que el disco va algo retrasado con respecto al imán; esto es, su velocidad es algo menor que aquél. Debido a ello a este sistema se lo denomina asíncrono que significa que no existe igualdad de velocidad o de sincronismo.

El experimento descrito no se puede convertir directamente en un motor ya que no transforma energía eléctrica en mecánica, sino que únicamente efectúa un acoplamiento electromagnético por ser necesario tener que mover el imán para hacer girar al disco. El que está produciendo el giro del imán es un campo giratorio.

Para lograr obtener este campo giratorio y desarrollar un motor útil, el método es empleando corriente alterna. Para ello se construyen dos electroimanes formando un ángulo recto, a los que se aplican a su vez dos corrientes alternas desfasadas entre ellas 90° .

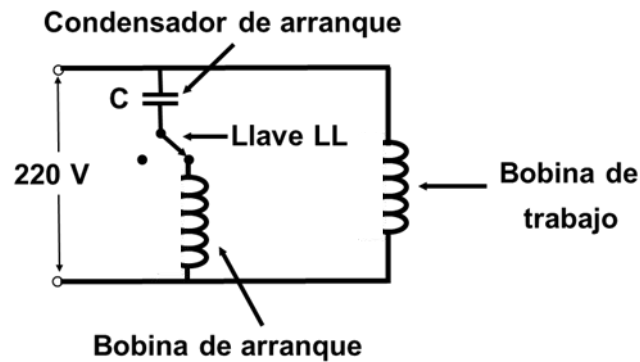


Este motor, que se conoce también como de inducción, se alimenta con una tensión monofásica de 220 Volt (motor de inducción monofásico). Tal como se expone en el dibujo de la figura anterior, si se aplica la misma tensión monofásica de 220 Volt a ambos arrollamientos, no se producirá un campo giratorio, y por ello el rotor queda detenido.

Si se aplica a cada par de electroimanes dos tensiones desfasadas 90° , se producirá un campo giratorio que inducirá en el rotor (inducido) una fem que producirá corriente en los conductores cortocircuitados y provocará la necesaria fuerza magneto motriz para que el motor gire y alcance su velocidad nominal.

El método para que el motor inicie su movimiento es aplicando a un par de electroimanes (que se denomina bobina de trabajo, ϕ_1) la tensión de 220V; y al otro par (bobina de arranque, ϕ_2) la misma tensión pero a través de un condensador que genera un campo desfasado del anterior en aproximadamente 90° . Por ello entonces se produce el campo giratorio y el motor arranca.

Para que el arrollamiento de arranque no quede permanentemente conectado consumiendo potencia extra que se traduce en calor en dicho bobinado, se desconecta una vez que el motor inicia su movimiento, tal como puede observarse en la figura.



El esquema circuital de la figura, muestra cómo se conectan los arrollamientos y la llave LL es un sistema centrífugo que posee el motor; que cuando el mismo está detenido, el condensador está conectado al bobinado de arranque. En estas condiciones, cuando se conecta la tensión, el mismo produce un campo desfasado 90° y el motor arranca. La llave se abre por sistema centrífugo, al adquirir velocidad el motor, lo desplaza y mientras está girando sigue desconectado.

En los motores de fracción de HP, como los que se utilizan en ventiladores, el condensador se deja permanentemente conectado ya que la potencia absorbida a la línea es muy pequeña. El sistema centrífugo se utiliza para todos los motores monofásicos desde 1/5 hasta 3 HP. Estos motores son muy utilizados en heladeras, lavarropas, etc.

Respecto a la velocidad de estos motores, que se denomina " n_s " (velocidad de sincronismo) ella es proporcional a la frecuencia de la línea e inversamente proporcional a los pares de polos de trabajo.

$$\eta_s = \frac{\text{frecuencia} \cdot 60 \text{ seg}}{N^\circ \text{ de polos}} \quad \rightarrow \quad \eta_s = \frac{50 \text{ Hz} \cdot 60 \text{ seg}}{N^\circ \text{ de par de polos}}$$

$$\eta_s = \frac{3000}{N^\circ \text{ de par de polos}}$$

Por lo tanto, para una máquina de 2 pares de polos, su velocidad será:

$$\eta_s = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

Esta velocidad η_s , en el experimento de Ferraris, es la de sincronismo, o sea que el disco giraría sincrónico con el imán, algo imposible ya que no habrá corrientes inducidas en el disco.

En el inducido, para que se genere la fuerza magneto motriz que hace girar al rotor, la fem solo se induce si el rotor se atrasa. Por ello, en este motor de inducción el rotor gira a una velocidad menor que la calculada con la expresión anterior. La velocidad de dicha expresión es la de sincronismo ya que el rotor giraría en forma directamente proporcional a la frecuencia de la tensión (de allí el nombre de sincrónico).

El atraso del rotor se denomina deslizamiento " S ". En los motores de dos pares de polos, la velocidad nominal (η_n) es de aproximadamente 1480 rpm.

Conociendo la velocidad de sincronismo y la nominal se puede calcular el deslizamiento con la siguiente expresión:

$$S = \frac{\eta_s - \eta_n}{\eta_s} \quad \rightarrow \quad S = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,0133$$

Para hablar sobre los motores eléctricos asíncronos trifásicos y monofásicos es importante considerar los criterios más utilizados para seleccionar el motor eléctrico más adecuado para la aplicación deseada.

Potencia: Es la fuerza que el motor genera para mover la carga en una determinada velocidad. Esta fuerza es medida en HP (horse power), cv (caballo vapor) o en kW (Kilowatt) Comentario: HP y cv son unidades diferentes de kW.

De	Multiplique por	Para obtener
HP o cv	0,736	kW
KW	1,341	HP o cv

Para convertir los valores de unidades de potencia, usted puede usar las fórmulas de la tabla anterior.

Ejemplo: Dado un motor de 5 CV, transforme para kW:

$$5 \text{ cv} \times 0,736 \text{ W} = 3,68 \text{ W}$$

Nota: La potencia especificada en la placa de identificación del motor, indica la potencia mecánica disponible en el eje de salida.

Para obtener la potencia eléctrica consumida por el motor (kW . h), se divide la potencia en kW por su eficiencia (η).

Ejemplo: 5 cv = 3,68 kW (potencia mecánica)

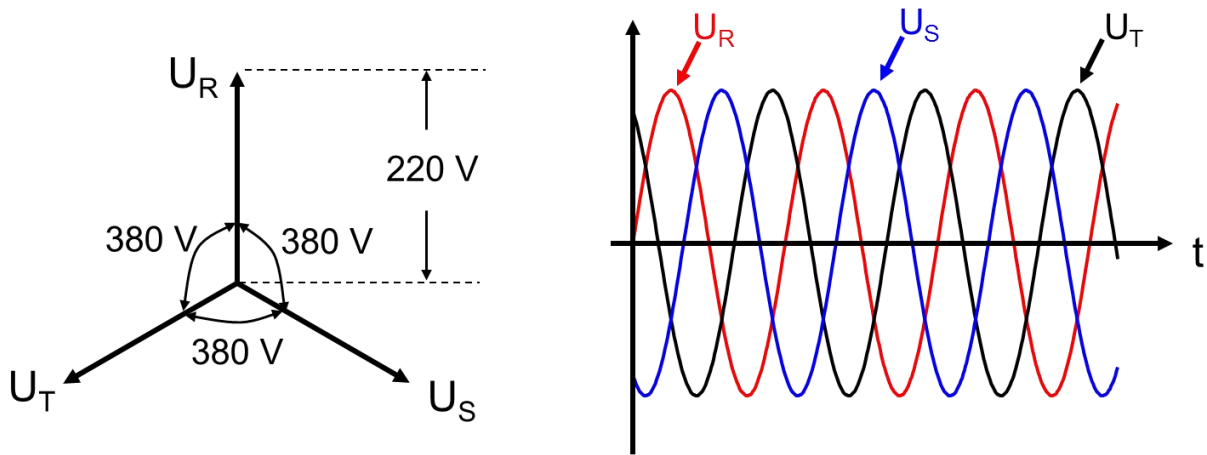
$\eta = 84,5\%$ (Dato de placa para motor de 5 HP)

$$P (KW.h) = \frac{3,68}{0,845} = 4,35 \text{ KW}$$

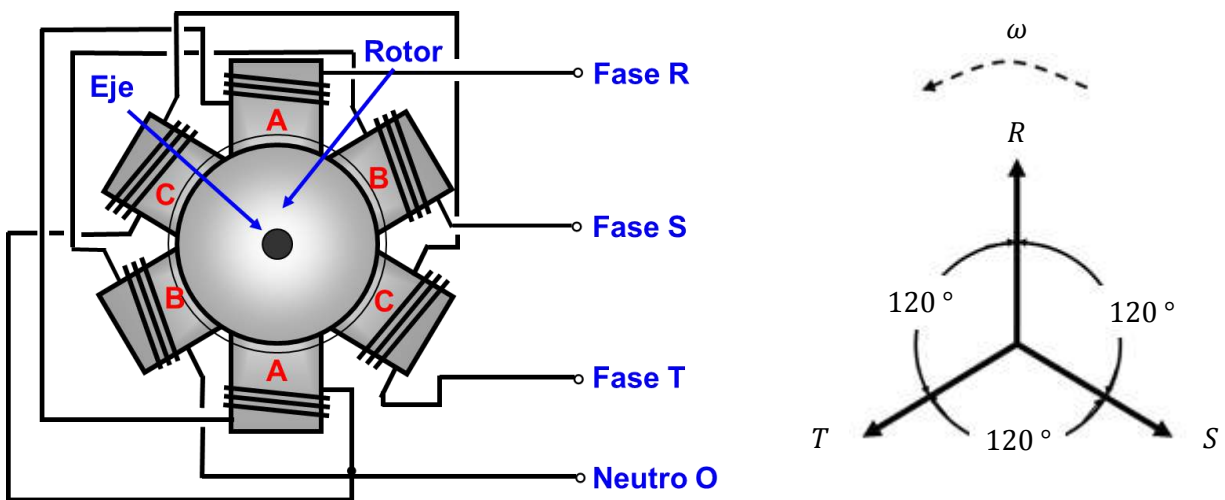
11.2.5.2 Motores de inducción trifásicos.

Los motores de inducción trifásicos son máquinas que se podrían considerar como ideales. Debe recordarse que el sistema trifásico consiste en tres fases

de 380 V desfasadas en 120° entre ellas, de acuerdo al esquema siguiente que se expone en la figura



De acuerdo al sistema eléctrico, se puede construir un motor de inducción en el cual el flujo rotante estará de acuerdo a las fases. Ello hace que la máquina no necesite mecanismo de arranque y así el motor es muy sencillo. Su funcionamiento es muy suave por el flujo rotante. La construcción del mismo, para una velocidad nominal de aproximadamente 1480 RPM, se basa en la realización del inductor con tres pares de polos y el inducido con un rotor en jaula de ardilla. En la próxima figura se muestra el esquema de este motor.



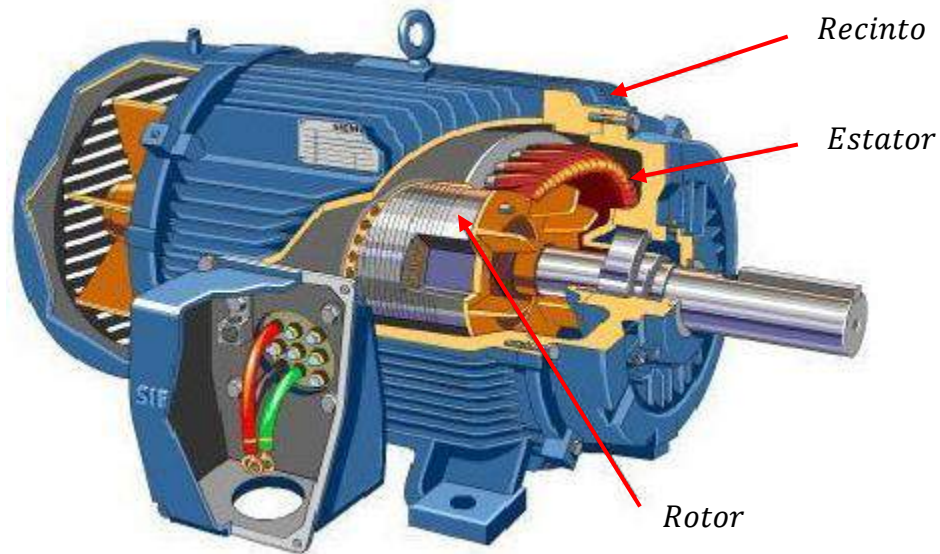
En la figura se pueden observar los tres electroimanes que actúan de inductores: A , B y C que poseen los correspondientes arrollamientos conectados en serie respectivamente. Cada extremo de cada arrollamiento va conectado a cada fase y cada terminación se ha unido conformando un punto común que se conecta al neutro.

Esta conexión en estrella se corresponde con las tensiones del generador o de las líneas, tal como se dibuja a la izquierda del motor. Se observa que las tensiones aplicadas al motor desfasadas 120° entre ellas producirán tres flujos rotantes también desfasados, y por ello se inducirán en el rotor corrientes que producirán la necesaria fuerza magneto motriz que hará girar al mismo sin ningún dispositivo de arranque. La velocidad de este motor se calcula de acuerdo a la expresión:

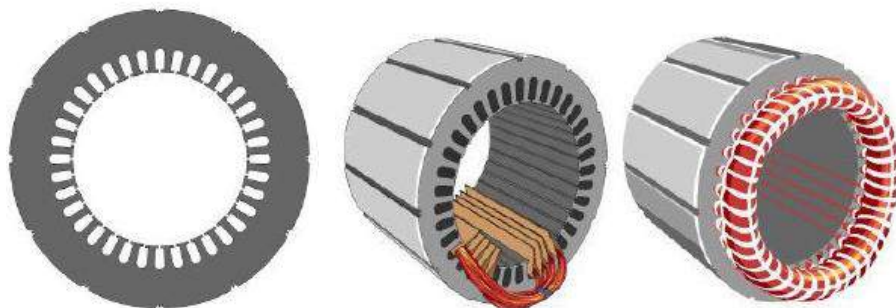
$$\eta_s = \frac{\text{frecuencia} \cdot 120 \text{ seg}}{\text{N}^\circ \text{ de polos}}$$

Esta velocidad es la de sincronismo y no es la real ya que como se expresó anteriormente, no se puede alcanzar. Por ello se produce el deslizamiento y la velocidad final del motor es la nominal n_n .

De lo expresado anteriormente el motor de uso más común en la industria es el motor de tres fases de inducción este tipo de motor será el que se usará para describir las partes de un motor CA. Este tipo de motores posee tres partes principales: el rotor, el estator y el recinto. Pueden verse las tres partes mencionadas en la figura siguiente:



El estator es la parte estacionaria del circuito electromagnético del motor. El núcleo del estator se compone de muchas hojas de metal delgado, llamadas láminas, que se utilizan para reducir las pérdidas de energía que se obtendrían si se utiliza un núcleo sólido. Puede verse la forma del estator en la próxima figura.



Las láminas del estator se apilan formando un cilindro hueco. Bobinas de cable aislado se insertan en las ranuras del núcleo del estator. Cuando el motor está en operación, los bobinados del estator están conectados directamente a la fuente de alimentación. Cada grupo de bobinas, junto con el núcleo de acero que rodea, se convierte en un electroimán, cuando se aplica la corriente. El electromagnetismo es el principio básico de funcionamiento del motor. El rotor

es la parte giratoria del circuito electromagnético del motor. El tipo más común de rotor utilizado en un motor de inducción de tres fases es un rotor de jaula de Ardilla. El rotor de jaula de ardilla se llama así porque su construcción es una reminiscencia de las ruedas de ejercicio de rotación se encuentran en las jaulas de los Hámster pero probablemente existen este mismo tipo de estructuras para ardillas domésticas. El núcleo de un rotor de jaula de ardilla se hace por apilamiento de finas láminas de acero, ver siguiente figura, para formar un cilindro

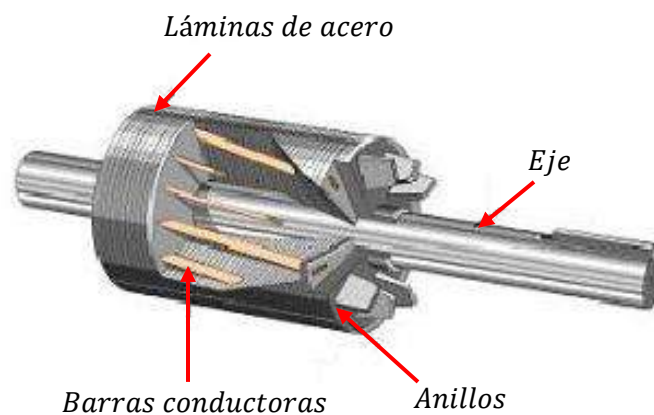


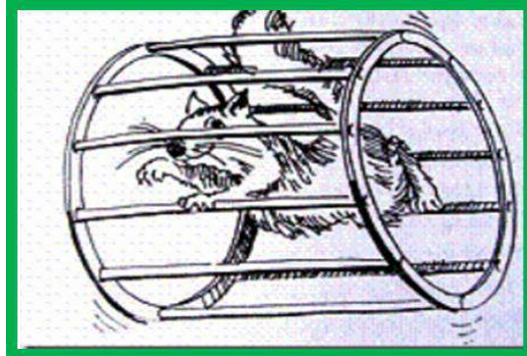
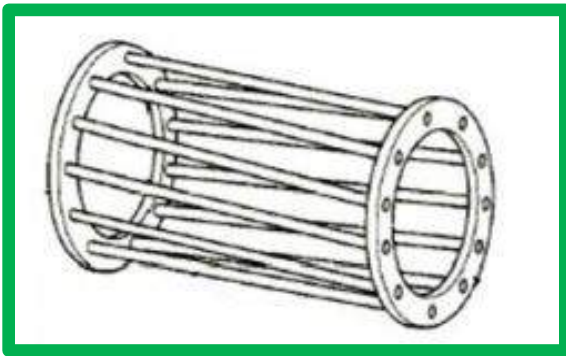
Rotor

Láminas del Rotor

En lugar de usar rollos de alambre como conductores, se usan barras conductoras en las ranuras equidistantes entre sí alrededor del cilindro. La mayoría de los rotores de jaula de ardilla son hechos en fundición de aluminio para formar las barras conductoras.

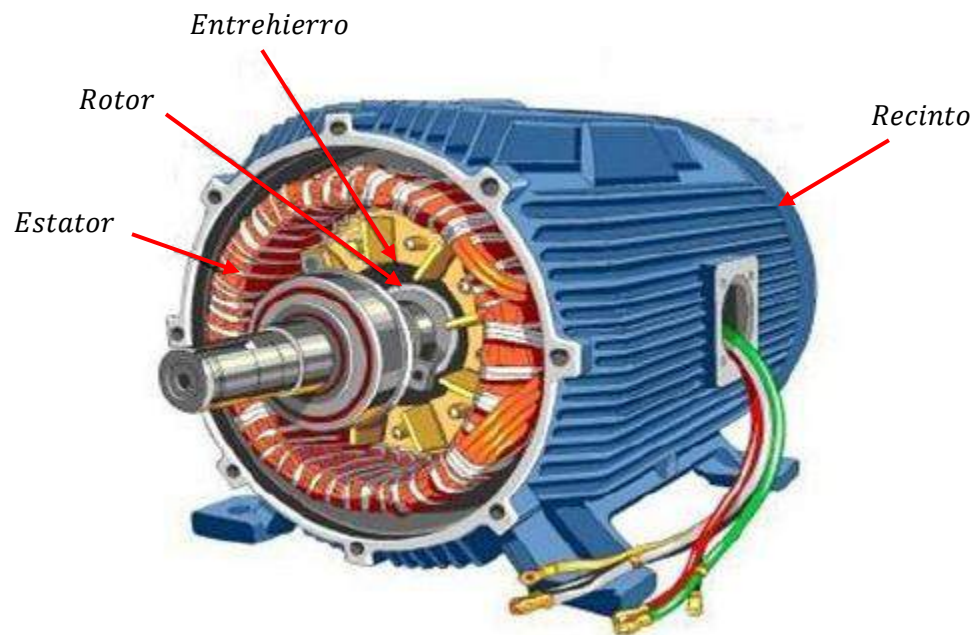
Después de la fundición a presión, las barras conductoras del rotor son mecánicamente y eléctricamente conectado con anillos extremos. El montaje se presiona sobre un eje de acero para formar un conjunto rotor. Puede verse el montaje en la figura:





El recinto consta de un marco (o palanca) y dos grupos de cajas de cojinetes. El estator está montado en el interior del marco. El rotor se ajusta en el interior del estator con una ligera capa de aire (entrehierro) que lo separa del estator. No hay conexión física directa entre el rotor y el estator.

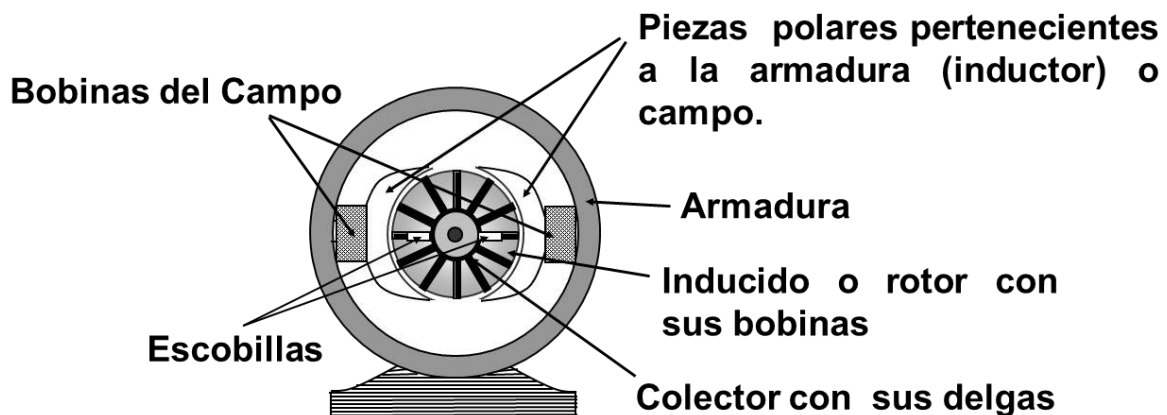
El recinto protege las partes internas del motor del agua y otros elementos del medio ambiente. El grado de protección depende del tipo de recinto. En la figura que se ve a continuación se muestra un recinto con las partes del motor montadas en él.



11.2.5.3 Motores Universales

El motor monofásico universal es un tipo de motor eléctrico que puede funcionar tanto con corriente continua (C.C.) como con corriente alterna (A.C.)

Cuenta con numerosas aplicaciones debido a su sencillez y a su costo reducido. Es un motor similar al de corriente continua ya que posee inductor o campo y un inducido o rotor con colector y escobillas. Van conectados en serie, recordando al motor de corriente continua; que consistía en aplicar una corriente a un electroimán inductor (campo) que creaba un campo magnético sobre un rotor formado por devanados sobre un cilindro de material magnético acoplado a un eje.



Este tipo de motor es ampliamente utilizado en algunas máquinas domésticas tales como: aspiradores de polvo, máquinas de coser, máquinas de afeitar y herramientas manuales tales como taladros.

Características de funcionamiento:

- En corriente continua es un motor serie normal con sus mismas características.
- En corriente alterna se comporta de manera semejante a un motor serie de corriente continua. Como cada vez que se invierte el sentido de la

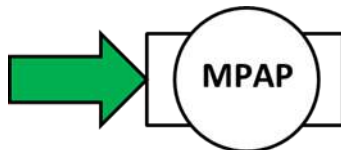
corriente, lo hace tanto en el inductor como en el inducido, con lo que el par motor conserva su sentido.

11.2.5.4 Preguntas de autoevaluación.

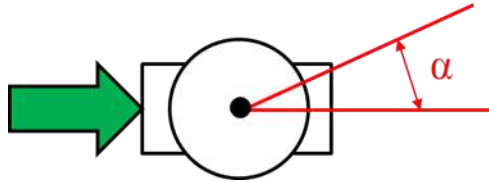
- 20) ¿ En qué principio se basa la máquina de inducción ? Explicar
- 21) Según la fuente alimentación, cuales son los tipos de motores que existen.
- 22) Mencione los tipos de motores que funcionan con corriente alterna.
- 23) ¿Cuáles son las ventajas de un motor asincrónico tipo jaula de ardilla?.
- 24) ¿Cómo está formado el rotor en un motor asincrónico tipo jaula de ardilla?.
- 25) ¿Puede buscar y adjuntar información técnica, fotografías e imágenes de los motores antes mencionados ?

11.2.6 Motores paso a paso

El motor a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados (denominado paso) dependiendo de sus entradas de control.



El movimiento descrito se llama PASO y el ángulo girado caracteriza al motor y es el Denominado ANGULO DE PASO



La conmutación se debe manejar de manera externa con un controlador electrónico y, típicamente, los motores y sus controladores se diseñan de manera que el motor se pueda mantener en una posición fija y también para que se lo pueda hacer girar en un sentido y en el otro.

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° .

Los motores paso a paso a diferencia de los motores CC giran un ángulo determinado en cada maniobra, es decir, hacen girar su eje un cierto grado a cada paso y se quedan parados en esa posición hasta que no cambiamos la tensión de las bobinas. Esto los hace ideales para el posicionamiento preciso de mecanismos y de pequeñas masas.

Además otra de sus características es que ejercen un par relativamente importante. Esto quiere decir que ejerce una fuerza considerable lo que permite que en muchas aplicaciones no sea necesario un mecanismo de reducción como en otros tipos de motor.

La idea de un motor paso a paso es relativamente sencilla: hay unos electroimanes que pueden ser alimentados y que están alrededor de un cilindro imantado montado en el eje. Cada vez que alimentamos un electroimán el cilindro gira hasta situar su campo magnético en oposición al del bobinado.

Una vez en esta posición se mantiene hasta que no cambien las alimentaciones de las bobinas. En la práctica la velocidad de rotación del eje es mucho menor que la de cualquier motor CC convencional. En un motor paso a paso la velocidad máxima suele ser de 2-3 revoluciones por segundo. La dirección de giro se controla siguiendo las secuencias en orden creciente o decreciente. La velocidad se controla simplemente variando la frecuencia a la que cambiamos la corriente en las bobinas, siguiendo siempre la misma secuencia. Si superamos la velocidad máxima a la que puede ir el motor nos encontraremos que el motor sigue un movimiento errático, no gira o incluso puede que gire en sentido inverso.

Finalmente, otro factor a tener en cuenta es que cuando aumentamos la velocidad, el par del motor decae rápidamente. Es decir, a velocidades pequeñas el motor tiene un par relativamente grande, por ejemplo comparado con un motor CC, pero a la velocidad límite el par se ha reducido drásticamente y dependiendo de la utilidad que le queramos dar esto puede representar un inconveniente importante.

A diferencia de los Motores-CC que giran a todo lo que dan cuando son conectados a la fuente de alimentación, los motores paso a paso solamente giran un ángulo determinado, por otro lado los motores de corriente continua no pueden quedar enclavado en una sola posición, mientras los motores paso a paso sí.

Ventajas :

- Ofrecen máximo par en régimen estático cuando las bobinas están energizadas
- Tienen una precisión de posicionamiento entre el 3 % y el 5 % del ángulo de paso.
- Tiempo de vida alto debido a la inexistencia de contactos eléctricos con el rotor (escobillas)
- Permite un control de velocidad en un amplio rango

Inconvenientes

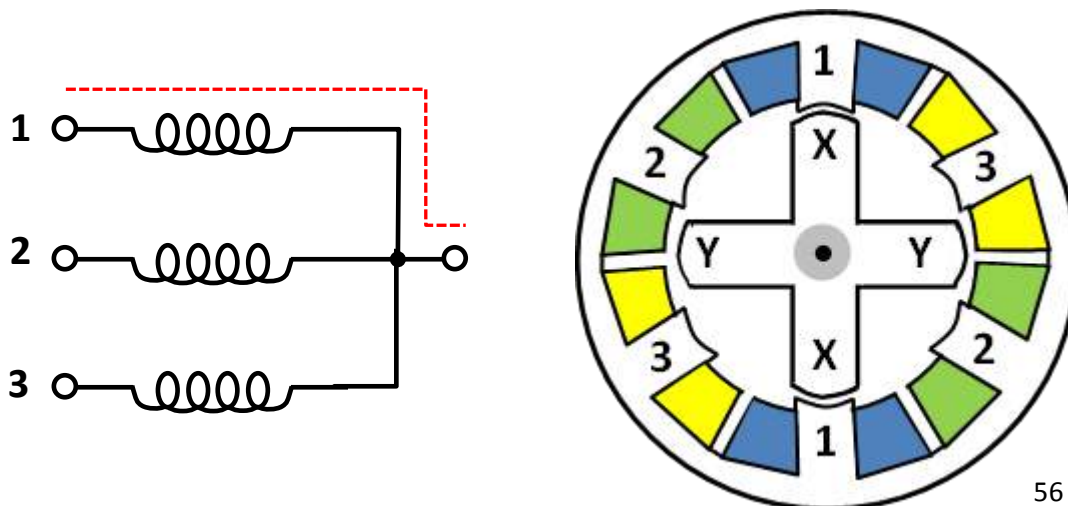
- No es fácil de controlar a velocidades altas.
- Ofrecen un menor par relacionado con un motor de C.C. de igual tamaño y desarrollan velocidades menores e ellos.

Existen 3 tipos fundamentales de motores paso a paso:

1. Motor de reluctancia variable.
2. Motor de imán permanente.
3. Motor híbrido

11.2.6.1 Motores de reluctancia variable

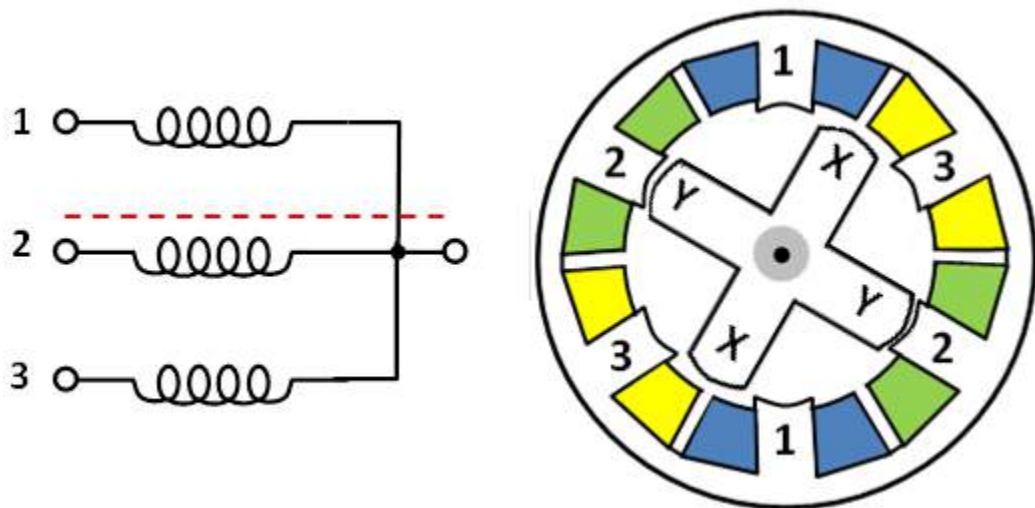
Tienen de 3 a 5 bobinas conectadas a un terminal común. En la figura se muestra un corte transversal de un motor de tres bobinas, de reluctancia variable y 30 grados por paso. El rotor en este motor tiene 4 dientes y el estator tiene 6 polos; con cada bobina arrollada sobre polos opuestos.



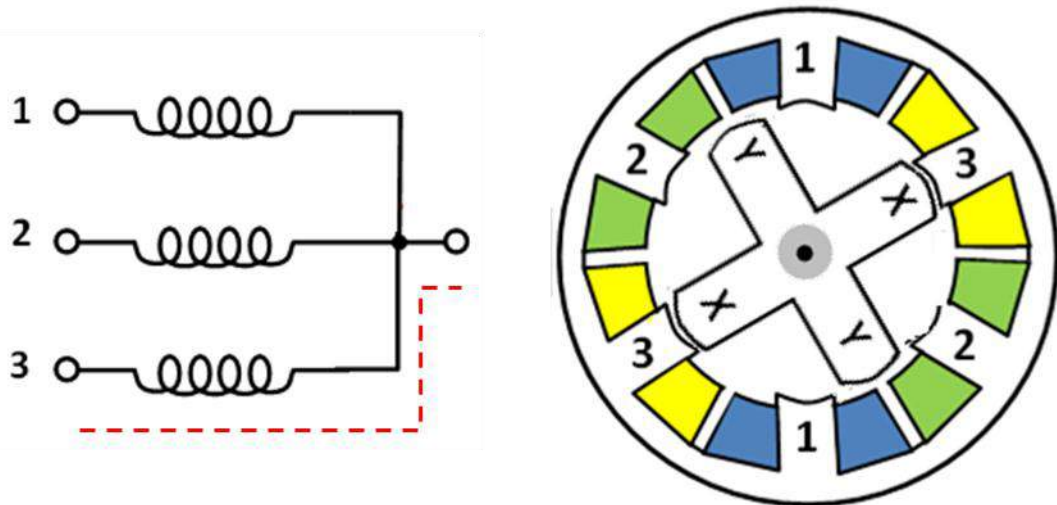
Los dientes de rotor marcados con una X son atraídos a la bobina 1 cuando ella es activada. Esta atracción es causada por el camino magnético del flujo generado alrededor de la bobina y el rotor.

El rotor experimenta una torsión y mueve el rotor en línea con las bobinas energizadas, minimizando el camino de flujo.

El movimiento del motor es en el sentido de las agujas del reloj cuando la bobina 1 es apagada y la bobina 2 es energizada. Los dientes de rotor marcados con la Y son atraídos hacia la bobina 2. Este resulta en un giro de 30 grados en el sentido de las agujas del reloj cuando Y se alinea con la bobina 2. Se consigue un giro continuo hacia la derecha, al energizar y des energizar secuencialmente las bobinas alrededor del estator.



Sucede lo mismo cuando se des energiza la bobina 2 y se energiza la bobina 3.



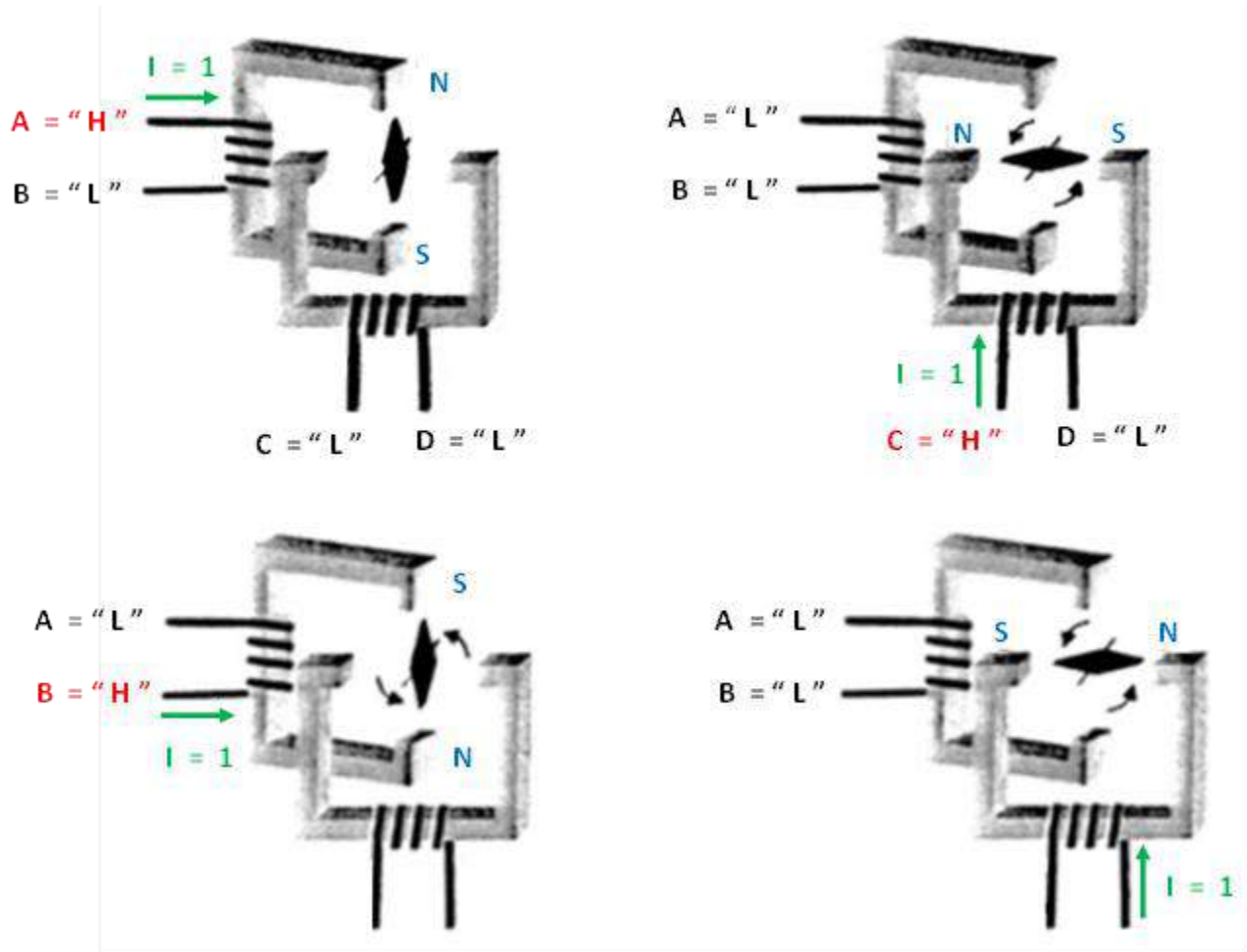
En la figura anterior ilustra el motor reluctancia variable más básico. En la práctica, estos motores típicamente tienen más polos y dientes para ángulos de paso más pequeños. El número de polos puede incrementarse añadiendo bobinas, por ejemplo, 4 o 5 bobinas para pequeños ángulos de paso

11.2.6.2 Motores de imán permanente

El rotor está compuesto por uno o más imanes permanentes. Cada imán da lugar a dos polos (norte y sur). El número de polos caracteriza el tipo de motor.

$$\text{Angulo de paso} = \frac{360}{N^{\circ} \text{ de fases} \cdot N^{\circ} \text{ de polos}}$$

Si se tienen dos fases y dos polos :



Si se aumenta el N° de polos o el N° de fase se aumenta la resolución



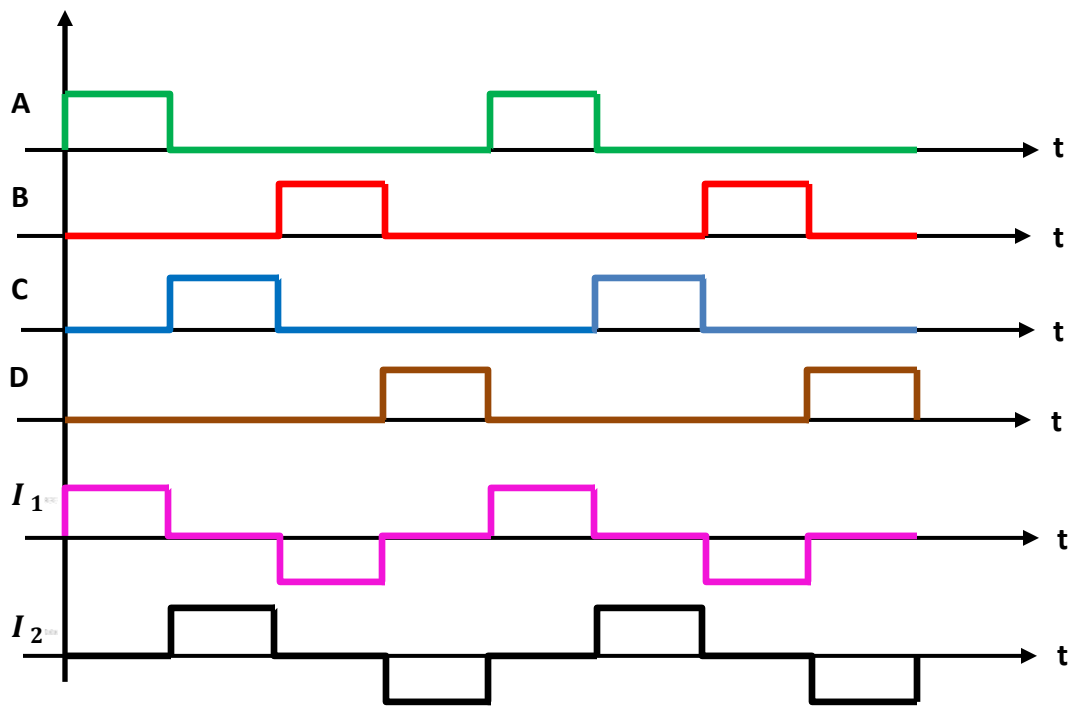
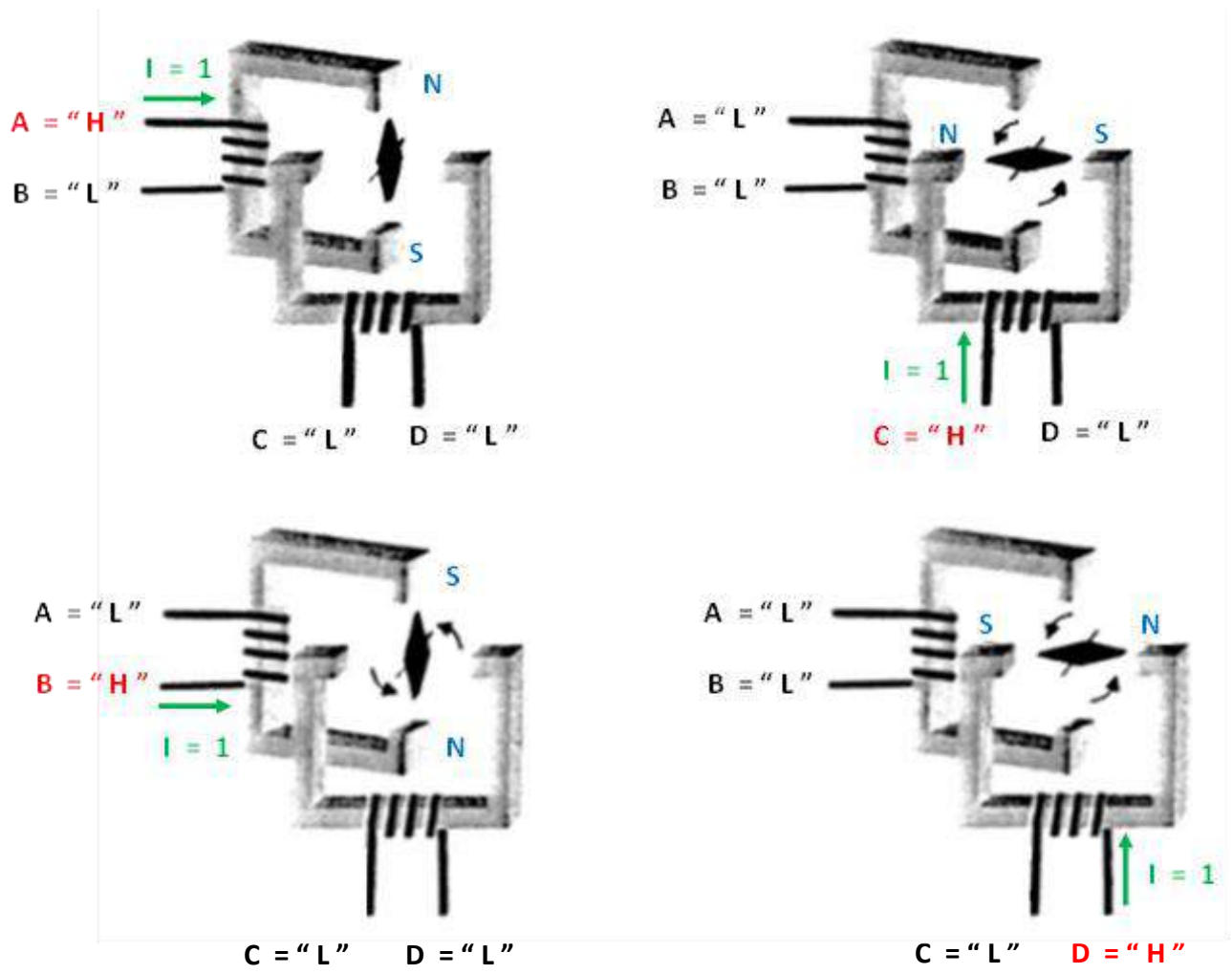
$$\text{Angulo de paso} = \frac{360}{2 \cdot 8} = 22^{\circ} 30'$$

Para realizar el control de los motores paso a paso, es necesario generar una secuencia determinada de impulsos. Además es necesario que estos impulsos sean capaces de entregar la corriente necesaria para que las bobinas del motor se exciten.

Para controlar un motor paso a paso unipolar se debe alimentar el común del motor con Vcc y conmutar con masa en los cables del devanado correspondiente. Con esto se logra una correcta corriente por la bobina, la cual genera un campo electromagnético que atrae el polo magnetizado del rotor lo que provoca que el eje del motor gire.

Esta secuencia de pulsos son proporcionado por una lógica digital con un circuito electrónico afín a cada motor. No es tema de esta cátedra

En la siguiente figura se aprecia la forma de activar cada una de las bobinas de un motor de imán permanente de dos polos y dos fases.



Para invertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.

Entre las aplicaciones más importantes se pueden citar:

- Válvulas de respiradores artificiales,
- Colimadores de tubos de rayos X
- Impresoras,
- Movimientos de cámaras
- Antenas de satélites
- Telescopios
- etc

11.2.6.3 Preguntas de autoevaluación.

- 26) ¿Cómo se denominan en inglés los motores paso a paso?.
- 27) ¿Cuándo son requeridos los MPAP?. Dar ejemplos de aplicación.
- 28) ¿Qué habilidad poseen estos motores?.
- 29) Si un MPAP tiene un paso de 3.6 grados. ¿Cuántos pasos deberá dar para realizar un giro completo?.
- 30) ¿Cómo están constituidos internamente estos motores?.

11.3 Bibliografía

- [1] Knowlton, A. E.; "Manual Estándar del Ingeniero Electricista"; Editorial LABOR; 1956.
- [2] Pueyo, Héctor, Marco, Carlos y QUEIRO, Santiago; "Circuitos Eléctricos: Análisis de Modelos Circuitales 3ra Ed. Tomo 1"; Editorial Alfaomega ; 2009.
- [3] Pueyo, Héctor, Marco, Carlos y QUEIRO, Santiago; "Circuitos Eléctricos: Análisis de Modelos Circuitales 3ra Ed. Tomo 2"; Editorial Alfaomega ; 2011.
- [4] Terman, Frederick E.; "Ingeniería en Radio"; Editorial ARBÓ; 1952.
- [5] PACKMAN, Emilio; "Mediciones Eléctricas"; Editorial ARBO; 1972.
- [6] CASTEJÓN, Agustín y SANTAMARIA, Germán; "Tecnología Eléctrica"- Editorial Mc GRAW HILL; 1993.
- [7] SANJURJO NAVARRO, Rafael; "Maquinas Eléctricas"; Editorial Mc GRAW HILL; 1989.
- [8] POLIMENI, Héctor G.; "Documentos de Cátedra"; 2009.